ȘTIINȚA PENTRU TOȚI

86

PETRE RAICU

Genetica și evoluția viețuitoarelor

Știința pentru toți

Cunoștințe despre univers

RP 120

COLECȚIA „ȘTIINȚA PENTRU TOȚI"
apare sub egida
CONSILIULUI NAȚIONAL
AL
FRONTULUI UNITĂȚII SOCIALISTE

PETRE RAICU

Genetica și evoluția viețuitoarelor

EDITURA ȘTIINȚIFICĂ ȘI ENCICLOPEDICĂ
București — 1979

Coperta colecției: KERRY EUGEN

Redactor : LAURA MĂRGINEANU
Tehnoredactor : CONSTANTIN IORDACHE

Coli de tipar : 3,75. Tirajul : 28 500 ex.
Bun de tipar : 20. VIII. 1979

Tiparul executat sub comanda nr. 186
la Întreprinderea poligrafică „13 Decembrie 1918",
str. Grigore Alexandrescu nr. 89—97,
București,
Republica Socialistă România

CE ESTE VIAȚA ?

Problema originii vieții pe Pământ a suscitat întotdeauna discuții aprinse. Unii oameni de știință consideră că această problemă este insolubilă pentru că nu se pot reconstitui exact condițiile care au existat acum aproape 4 miliarde de ani, în timp ce alții o simplifică la maximum admițînd că amestecul a diferite substanțe chimice și produșii care apăreau au trebuit să ducă la nașterea materiei vii.

Desigur că problema apariției vieții pe Pământ este foarte complexă și comportă încă unele necunoscute. Cercetările mai noi de biologie moleculară au reușit însă să ne dea o imagine aprofundată, mai reală a structurii și funcțiilor materiei vii, fapt care a determinat progrese în înțelegerea mecanismelor intime care au dus la apariția vieții. Pe de altă parte, studiul condițiilor de mediu existente pe Pământ acum circa 4 miliarde de ani a permis reconstituirea cu o anumită fidelitate a acestor condiții și a făcut posibile experiențe de simulare a sintezei unor molecule ce intră în alcătuirea materiei vii. În sfîrșit, zborurile cosmice au determinat o mai bună cunoaștere a spațiului extraterestru în care au reușit să identifice substanțe organice, unele destul de complexe. Ca urmare, a fost elaborată în ultima vreme o teorie științifică a originii vieții pe Pă-

mînt, la fundamentarea căreia au adus o contribuție remarcabilă savantul englez J. B. S. Haldane și cel sovietic, A. J. Oparin. Conținutul acestei teorii va fi prezentat în cele ce urmează.

Să vedem mai întîi ce este materia vie și care sînt atributele ei esențiale. Materia vie, formă superioară de existență a materiei, este organizată în celule și viața se manifestă numai în cadrul organismelor cu structură celulară. Virusurile, cele mai simple forme de viață, nu au o organizare celulară și ca urmare ele manifestă activitate vitală numai în cadrul celulelor gazdă. Dintre viețuitoarele cunoscute, multe grupuri, cum sînt bacteriile și algele albastre-verzi, sînt de fapt niște celule primitive cu o structură simplă, asemănătoare cu a primelor celule apărute pe Pămînt acum circa 3 miliarde și jumătate de ani. Organismele de acest tip nu au un nucleu individualizat, ci difuz, fapt pentru care ele au fost denumite *procariote* (vezi pag. 29).

Restul viețuitoarelor sînt formate din celule *eucariote* (vezi pag. 32) care au un nucleu individualizat. De pildă, în alcătuirea corpului omenesc, intră circa 2 000 de miliarde de celule.

Din punct de vedere chimic, cele 2000 de miliarde de celule sînt compuse din : 40 kg oxigen, 11 kg carbon, 6 kg hidrogen, 2 kg azot, 1 kg de calciu, 1 kg fosfor, potasiu, sulf, sodiu, clor, magneziu și fier. La acestea se mai adaugă o cantitate extrem de mică de zinc, cobalt și mangan. Elementele chimice se găsesc sub forma unor compuși organici speciali : proteine, acizi nucleici, lipide, glucide etc. Ca o amintire a originii acvatice a materiei vii, ca și a primilor pași ai evoluției ei, apa constituie cea mai mare parte a oricărui organism viu. De pildă, corpul unui om adult conține 66% apă, 15,86% proteine, 12,84% lipide, 0,30% glucide și 5% diferite săruri minerale. Iar la bacteria *Dialister pneumosintes*, care prezintă cea mai mică celulă

de tip procariot cunoscută pînă în prezent, apa reprezintă 75%, iar restul este reprezentat de proteine, acizi nucleici, glucide, lipide etc. Bacteria conține circa 800 de tipuri diferite de proteine care, prin activitatea lor enzimatică, asigură catalizarea a 500—1000 de reacții chimice indispensabile vieții. Aceasta este limita inferioară cunoscută la care se manifestă viața.

Cu toate că uneori celulele sînt extrem de mici, ca în cazul bacteriei citate, ele reprezintă un microcosmos de o imensă complexitate. Astfel, celulele sînt capabile să „fabrice" sute și mii de substanțe organice extrem de variate și exact în cantitățile cerute de necesitățile lor structurale și funcționale, iar desfășurarea normală a activităților vitale în celule cere o coordonare precisă a miilor de reacții chimice, catalizate de enzime. Structura, funcțiile și întreaga activitate celulară sînt determinate de *programul genetic* înscris biochimic în acidul dezoxiribonucleic (ADN) din cromozomi.

În concepția actuală, celula este comparată adesea cu un uriaș combinat chimic care lucrează cu o mare eficiență, avînd propriul său centru de comandă în cromozomi, cu uzine energetice reprezentate de mitocondrii, cu uzine pentru transformarea energiei luminoase în energie chimică — în cloroplaști, cu uzine de fabricare a proteinelor — în ribozomi, cu posibilități de transmisie a informațiilor de la centrul de comandă spre citoplasmă și viceversa etc.

Comparația cu combinatul chimic nu este deloc exagerată dacă ne gîndim că în celulă pot fi produse, simultan sau succesiv, un mare număr de compuși chimici și, ceea ce este remarcabil, exact în cantitățile necesare funcționării sale în condiții optime. De pildă, în celula bacteriei *Escherichia coli*, care este cam de 500 ori mai mică decît o celulă caracteristică plantelor și animalelor superioare, se găsesc circa 5000—6000 substanțe chimice diferite, de la cele mai simple, cum

sînt apa și bioxidul de carbon și pînă la cele mai complexe, cum sînt acizii nucleici, proteinele și enzimele. Toate aceste substanțe sînt produse și folosite de celula bacteriană cu un consum minim de energie. Înalta eficiență cu care sînt fabricate substanțele necesare ar putea fi invidiată de oricare combinat industrial ultramodern. Ea se datorează faptului că celulele au capacitatea să-și autoregleze activitatea în funcție de condițiile de mediu ambiant și ca urmare, la un moment dat, ele produc numai substanțele de care celula, și respectiv organismul căruia îi aparține, are nevoie și numai în cantitățile necesare.

GENELE ȘI PROGRAMUL GENETIC AL ORGANISMELOR

Imaginea actuală a celulei, prin care aceasta este reprezentată ca un adevărat microcosmos, este rezultatul unor cercetări ample și aprofundate, în care s-au folosit metode și tehnici de laborator de mare finețe. În acest fel, diferiți constituenți ai celulei au putut fi separați și identificați, studiați din punctul de vedere al structurii lor moleculare, încît în prezent avem o imagine mult mai reală a structurilor și funcțiilor diferitelor tipuri de celule vii.

Caracteristic pentru toate celulele este faptul că ele au un anumit *program genetic*, în care se găsește codificată biochimic (în moleculele de ADN) informația necesară realizării structurilor și funcțiilor lor. Evident că organismele mai evoluate, de pildă celulele care au nucleu adevărat (eucariote), au nevoie de o cantitate mai mare de informații genetice, un program genetic mai bogat, comparativ cu celulele mai simple, care nu au nucleu (procariote). Cercetările de biologie moleculară recente au demonstrat că celulele, indiferent de gradul lor de complexitate, posedă toate un același sistem de înregistrare a informației genetice.

Ce este însă programul genetic al celulelor și cum funcționează el ? După cum se știe, diferitele caractere și însușiri morfologice, fiziologice, biochimice etc. ale organismelor sînt determinate ereditar de genele din cromozomi, totalitatea acestor gene alcătuind ceea ce se cheamă *programul genetic.*

În a doua jumătate a secolului al XIX-lea Gregor Mendel a descoperit primele legi ale eredității și a pus astfel bazele unei noi științe care studiază ereditatea organismelor și care a fost denumită *genetică.* Ulterior s-a descoperit faptul că factorii ereditari mendelieni, denumiți mai tîrziu *gene*, se găsesc plasați în cromozomii celulelor.

De multă vreme, geneticienii caută să afle în ce constă substratul material al eredității, mecanismele prin care informația genetică se înregistrează, se conservă și se transmite la descendenți, din ce sînt alcătuite și cum funcționează genele.

În anul 1944 cercetătorul american O. T. Avery și colaboratorii săi au reușit să facă o descoperire senzațională, și anume ei au constatat experimental că acidul dezoxiribonucleic (ADN) de la un tip de pneumococi este capabil să inducă modificări ereditare dirijate la un alt tip de pneumococi (fig. 1). Cercetările lor constituie piatra de temelie a unei noi științe numită *genetica moleculară*, care avea să revoluționeze un întreg domeniu al biologiei.

Cercetările de genetică moleculară, care s-au amplificat și diversificat considerabil după aceea, au drept scop studiul eredității la nivel subcelular și molecular, căutînd să descopere mecanismele intime care stau la baza procesului de transmitere ereditară a caracterelor, precum și a celor prin care se realizează variabilitatea ereditară a organismelor.

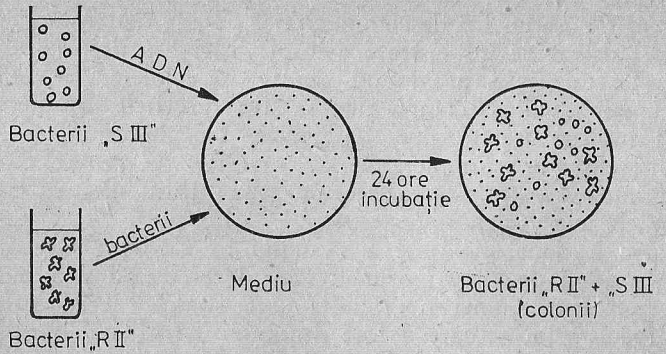

Fig. 1 — Schema experienței lui O. T. Avery și colaboratorii: prin cultura unui tip de bacterii (R II) pe un mediu la care s-a adăugat ADN de la alt tip de bacterii (S III), bacteriile R II se transformă în S III. S-a demonstrat astfel rolul genetic al ADN.

După descoperirea fenomenului de transformare la microorganisme cu ajutorul ADN, s-a descoperit un alt fenomen de importanță majoră, și anume faptul că la unele virusuri lipsite de ADN și care conțin numai acid ribonucleic (ARN), rolul de a înregistra, conserva și transmite informația genetică îl are acest ARN.

În anul 1953 a avut loc o descoperire de mare importanță în istoria acizilor nucleici, deoarece în acest an americanul J. Watson și englezul F. Crick, studiind structura ADN, au reușit să identifice poziția atomilor și respectiv alcătuirea macromoleculei de ADN, fapt care a făcut posibilă dezvoltarea considerabilă a cercetărilor ulterioare.

Acizii nucleici sînt substanțe macromoleculare alcătuite din unități mai simple denumite nucleotide. O nucleotidă este formată dintr-o bază azotată, un zahar și un radical fosforic. Bazele azotate din macromolecula acizilor nucleici sînt de două tipuri: purinice și pirimidinice, ele rezultînd dintr-un nucleu co-

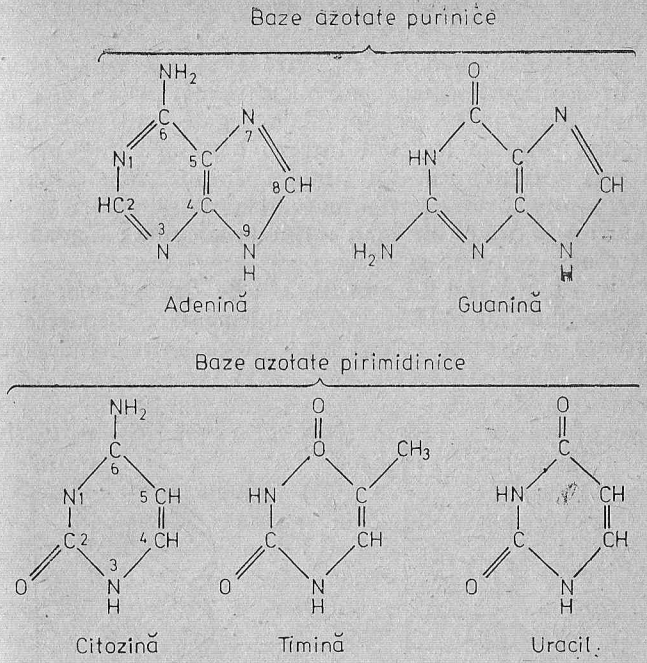

Fig. 2 — Bazele purinice și pirimidinice care intră în alcătuirea acizilor nucleici.

mun denumit purină și respectiv pirimidină, derivați din inelul benzenic. Bazele azotate purinice din ADN sînt adenina și guanina, iar cele pirimidinice sînt citozina și timina (fig. 2). În cazul ARN timina este înlocuită de o altă bază, și anume de uracil.

Cercetările lui J. Watson și F. Crick (1953), pentru care ei au primit premiul Nobel, au arătat că macromolecula de ADN este formată din două catene polinucleotidice paralele, înfășurate elicoidal în jurul unui ax

și avînd una o direcție ascendentă, iar cealaltă descendentă (fig. 3).

Spre deosebire de ARN, care este de regulă format dintr-o singură catenă polinucleotidică, ADN este alcătuit din două catene paralele, legate între ele întotdeauna printr-o legătură între o bază azotată purinică și una pirimidinică. Ca urmare, în macromolecula de ADN nu există decît următoarele patru tipuri de legături: adenină-timină; timină-adenină; guanină-citozină; citozină-guanină.

Avînd o astfel de structură, cele două catene polinucleotidice ale ADN sînt complementare, deoarece de ordinea în care se succed nucleotidele într-una depinde

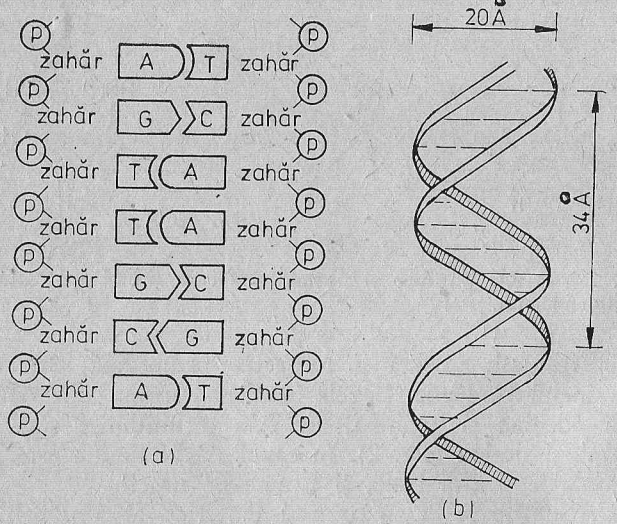

Fig. 3 — Macromolecula de ADN alcătuită din nucleotide care se succed în mod variat (*a*) și în care cele două catene sînt răsucite elicoidal una în jurul celeilalte (*b*).

ordinea nucleotidelor în cealaltă. Bazele purinice și pirimidinice sînt unite între ele prin legături duble sau triple de hidrogen, care, fiind în număr suficient de mare de-a lungul macromoleculei, asigură coeziunea și stabilitatea ADN.

Studiul ADN provenit de la diferite specii de plante, animale și microorganisme a arătat că el suferă variații mari de la o specie la alta, în ce privește cantitatea diferitelor baze azotate și mai ales raportul citozină + guanină/adenină + timină. Pe această bază s-a ajuns la concluzia că deosebirea esențială între ADN-ul provenit de la diferite specii constă în ordinea de succesiune a legăturilor între bazele azotate purinice și pirimidinice, în timp ce raportul dintre bazele purinice și pirimidinice se menține constant și egal cu unitatea.

Deoarece macromoleculele de acizi nucleici au de obicei dimensiuni foarte mari, fiind formate dintr-un număr mare de nucleotide, s-a ajuns la concluzia că prin modificarea secvenței celor 4 tipuri de nucleotide se poate înregistra o cantitate enormă de informație genetică. Într-adevăr, studiile de genetică moleculară au reușit să demonstreze că unei secvențe de 3 nucleotide, denumită *codon*, din macromolecula de ADN îi corespunde un anumit aminoacid. Dacă ținem seama că sînt 4 tipuri de baze azotate, se poate ușor remarca faptul că se pot realiza 64 de combinații de 3 nucleotide, adică 4^3 codoni.

Numărul de aminoacizi care intră însă în alcătuirea proteinelor cu rol structural sau enzimatic este de 20. Prin combinarea lor variată, prin modificarea secvenței lor în catenele polipeptidice, se pot realiza un număr imens de proteine. Pînă în prezent au fost deja identificate peste 100 000 de tipuri de proteine diferite în plante și animale.

Pe baza celor arătate, *gena poate fi definită drept un segment din macromolecula de ADN, formată dintr-un număr de codoni identic cu numărul de aminoacizi şi care conţine codificată biochimic informaţia genetică necesară sintezei unei catene polipeptidice.*

În prezent este bine cunoscut faptul că existenţa materiei vii este legată în special de două grupe mari de substanţe : proteinele şi acizii nucleici. În timp ce proteinele au un rol important în realizarea structurilor celulare şi virale, precum şi în metabolismul celular, acizii nucleici şi mai ales acidul dezoxiribonucleic (ADN) au rolul de a înregistra informaţia genetică şi în acest fel de a controla sinteza proteinelor. *Primul organism viu, apărut în negura timpurilor, n-a fost altceva decît un sistem de proteine a căror menţinere şi continuitate depindeau de informaţia genetică din acizii nucleici, adică de un anumit program genetic.*

Legătura dintre acizii nucleici şi proteine se realizează cu ajutorul codului genetic, prin care o secvenţă de 3 nucleotide din ADN codifică un anumit aminoacid în molecula proteică. Relativ recent s-a reuşit descoperirea semnificaţiei precise a celor 64 triplete de nucleotide (codoni) care alcătuiesc *codul genetic* (fig. 4). S-a descifrat astfel alfabetul vieţii, cu ajutorul căruia la toate organismele vii, de la cele mai simple virusuri la cele mai evoluate mamifere, inclusiv omul, se realizează legătura dintre acizii nucleici şi proteine. Fiecare specie şi chiar individ conţine propriul său *program genetic* înscris cu ajutorul codului genetic în acizii nucleici şi prin care sînt determinate şi transmise ereditar diferitele sale caracteristici morfologice, fiziologice, biochimice etc.

Una dintre caracteristicile esenţiale ale codului genetic o constituie *universalitatea* sa, prin care se înţelege faptul că, aşa cum am arătat mai sus, el este identic la toate organismele vii. Aceasta demonstrează evi-

Prima nucleotidă a codonului 5'	A doua nucleotidă a codonului				A treia nucleotidă a codonului 3'
	U	C	A	G	
U	UUU, UUC — Fenilalanină UUA, UUG — Leucină	UCU, UCC, UCA, UCG — Serină	UAU, UAC — Tirozină UAA — NON-2 UAG — NON-1	UGU, UGC — Cisteină UGA — NON-3 UGG — Triptofan	U C A G
C	CUU, CUC, CUA, CUG — Leucină	CCU, CCC, CCA, CCG — Prolină	CAU, CAC — Histidină CAA, CAG — Glutamină	CGU, CGC, CGA, CGG — Arginină	U G A G
A	AUU, AUC — Izoleucină AUA — Metionină sau formil met.	ACU, ACC, ACA, ACG — Treonină	AAU, AAC — Asparagină AAA, AAG — Lizină	AGU, AGC — Serină AGA, AGG — Arginină	U C A G
G	GUU, GUC, GUA, GUG — Valină	GCU, GCC, GCA, GCG — Alanină	GAU, GAC — Acid aspartic GAA, GAG — Acid glutamic	GGU, GGC, GGA, GGG — Glicocol	U C A G

Fig. 4 — Codul genetic ARN.

dent că el s-a constituit foarte devreme, odată cu apariţia vieţii pe Pământ, acum circa 3,6 miliarde de ani şi că după aceea n-a mai evoluat, deoarece cu ajutorul său se poate înregistra o cantitate practic infinită de informaţii. Deci se poate spune că întreaga viaţă pe Pământ are un strămoş comun, iar codul genetic are nu numai un caracter universal, ci şi o origine foarte veche.

După ce viaţa a apărut pe Pământ evoluţia sa a început foarte rapid. Prin modificări la nivelul acizilor nucleici, informaţia genetică s-a complicat şi sofisticat tot mai mult, iar mediul a jucat rolul de a selecta din multitudinea de indivizi numai organismele care întîmplător erau mai bine adaptate condiţiilor de viaţă.

Toate organismele vii au materialul genetic alcătuit din gene similare. Numai că în timp ce unele virusuri

au numai 4—5 gene, mamiferele, de pildă, posedă în nucleul celular cîteva zeci de mii de gene.

Din cele arătate reiese clar că apariţia vieţii pe Pămînt n-a fost posibilă decît odată cu sinteza primelor gene şi de constituirea unor programe genetice. Genele sînt deci tot atît de vechi ca şi viaţa, apariţia lor fiind simultană.

ETAPELE APARIŢIEI VIEŢII PE PĂMÎNT

Vîrsta Pămîntului este apreciată, pe baza cercetărilor actuale, la 4,5—5 miliarde de ani. Cea mai veche rocă sedimentară de pe Pămînt — găsită în Africa de Sud în apropierea oraşului Barberton — are o vîrstă de 3,6 miliarde de ani, iar cele mai vechi microfosile studiate au o vîrstă de circa 3,2 miliarde de ani. În prezent se consideră că viaţa a apărut pe Pămînt acum circa 3,6 miliarde de ani, la începutul erei precambriene.

În procesul de apariţie a vieţii pot fi identificate mai multe etape.

În prima etapă, ce începe cu aproape 4 miliarde de ani în urmă, atmosfera Pămîntului era bogată în hidrogen, metan, amoniac, apă şi săracă în bioxid de carbon şi oxigen liber. Sub influenţa unor radiaţii solare, de exemplu a celor ultraviolete, a descărcărilor electrice, a variaţiilor de temperatură etc., s-au sintetizat natural aminoacizi, baze azotate, acizi organici, acizi graşi, zaharuri. În oceane, mări şi în apele interioare s-a format astfel o adevărată *supă organică.*

În etapa următoare, pe măsură ce atmosfera se îmbogăţea în oxigen care apoi se transforma în ozon, acesta din urmă a format un strat în atmosferă care absorbea radiaţiile ultraviolete, fapt pentru care cele mai importante surse de energie au devenit lumina vi-

zibilă şi căldura. La temperatura de 200°C sau chiar mai puţin a început formarea legăturilor peptidice între aminoacizi şi sinteza unor *protenoizi,* substanţe proteice foarte simple, cu o greutate moleculară de pînă la 10 000 şi care manifestau chiar unele activităţi catalitice. În „supa organică" s-au sintetizat la suprafaţa macromoleculelor protenoizilor diferite substanţe organice mai complexe, ca nucleotide, polifosfaţi, porfirine, pigmenţi etc.

În sfîrşit, în etapa a treia a avut loc sinteza proteinelor propriu-zise şi a polinucleotidelor, mai întîi neenzimatic şi apoi catalizate de enzime. În interacţiunea acizilor nucleici cu proteinele s-au format complexe mai stabile decît fiecare component în parte. Dealtfel, în prezent materialul genetic se găseşte strîns legat de proteine care catalizează sinteza sa, iar informaţia genetică este translată în proteine. În cadrul acestui complex de nucleoproteine, acizii nucleici îndeplinesc rolul de matriţă datorită stabilităţii lor chimice relative mai mari. Proteinele, în schimb, datorită labilităţii lor chimice mai mari şi capacităţii reactive, au jucat rolul structural şi enzimatic, contribuind substanţial la mărirea complexităţii moleculelor de-a lungul evoluţiei. În timp a apărut astfel *primul organism viu care în esenţă era un sistem de proteine a cărui menţinere şi continuitate depindeau de informaţia genetică înscrisă în acizii nucleici.*

În sprijinul acestei teorii privind evoluţia vieţii stau cîteva argumente. Primul este posibilitatea sintezei nucleotidelor şi polinucleotidelor în absenţa catalizatorilor enzimatici. În prezent există date experimentale care arată posibilitatea sintezei abiogene a bazelor azotate. Astfel, s-a demonstrat experimental că în atmosfera primară a Pămîntului, din molecula de amoniac şi cian a fost posibilă sinteza abiogenă a bazelor azotate purinice şi pirimidinice care intră în alcătuirea acizilor

nucleici. Un alt argument important îl constituie prezența unor asemenea substanțe în meteoriți și în spațiul cosmic. Astfel, în meteoritul Murchison, care a căzut lîngă orașul cu acest nume din Australia în 1969, s-au identificat 18 aminoacizi diferiți, din care 6 se găsesc în proteinele normale. Este vorba de aminoacizii glicina, alanina, valina, prolina, acidul glutamic și acidul aspartic. Analiza acestor aminoacizi a demonstrat originea lor extraterestră. În același meteorit s-au identificat de asemenea mai multe baze azotate care intră în alcătuirea nucleotidelor sau a derivaților lor, cum sînt: adenina, guanina și 4-hidroxipurina.

În sfîrșit, menționăm și faptul că în spațiul cosmic au fost identificate prin analiză spectrală 27 tipuri de molecule cu importanță biologică, cum sînt: apa, amoniacul, hidrogenul sulfurat, oxidul de carbon, cianul, metanul, formaldehida, acidul formic etc.

În ceea ce privește polimerizarea nucleotidelor pentru a forma polinucleotide, există de asemenea un material experimental interesant. Recent s-a realizat sinteza abiogenă neenzimatică a unor polinucleotide cu o greutate moleculară de aproximativ 50 000. Sinteza artificială a polinucleotidelor se bazează pe folosirea unor agenți care realizează dehidrogenarea într-un mediu uscat, astfel că nucleotidele se polimerizează eliminînd apa.

Ținînd seama că bazele azotate prezintă anumite afinități chimice și că ele sînt complementare două cîte două (adenina cu timina și guanina cu citozina), existența unui lanț polinucleotidic inițial poate explica formarea unei catene polinucleotidice complementare. Într-adevăr, la majoritatea covîrșitoare a organismelor materialul genetic se prezintă sub formă bicatenară. Catena complementară are pe de o parte rolul de a mări stabilitatea macromoleculei și pe de alta, de a evita

„erorile" în cursul replicației și decodificarea incorectă a informației genetice.

Relativ la realizarea legăturii dintre acizii nucleici și proteine, trebuie luată în considerație afinitatea chimică a aminoacizilor față de nucleotide. Polimerizarea primară a nucleotidelor se poate realiza folosind drept catalizator, în absența enzimelor, suprafețele unor minerale sau argilei. Prin acțiunea unor enzime catalizatoare, viteza reacției crește considerabil și sinteza catenelor polinucleotide are loc rapid. Pe de altă parte, la lanțul polinucleotidic pot adera diferiți aminoacizi care pot polimeriza și forma polipeptide. Se poate considera astfel că *viața a apărut în momentul cînd a început sinteza polinucleotidelor cu o anumită secvențialitate de nucleotide, în conexiune cu sinteza polipeptidelor cu o secvență corespunzătoare de aminoacizi.*

Codul genetic a suferit o anumită evoluție în însuși procesul de apariție a vieții. Inițial probabil că tripletele de nucleotide nu aveau o semnificație precisă, diferiții aminoacizi avînd șanse egale de a fi încorporați în catena polipeptidică. Între acest moment și cel în care o anumită tripletă determină încorporarea unui singur aminoacid au existat probabil unele momente intermediare.

Într-o primă etapă, tripletele neavînd o semnificație precisă, avea loc o încorporare întîmplătoare a unor aminoacizi foarte diferiți. În aceste condiții nu avea loc translația unei secvențe nucleotidice într-o anume proteină, sistemul viu primitiv realizînd sinteza unor proteine statistice ce reprezentau variații ale unei structuri primare medii ce caracteriza gena respectivă. Aceste proteine statistice nu aveau activitate enzimatică sau aveau o activitate foarte redusă, care însă în condițiile mediului bogat primitiv permiteau supraviețuirea sistemului.

Odată cu schimbarea condițiilor de mediu și micșorarea cantitativă a concentrației substanțelor organice n-a mai fost posibilă supraviețuirea sistemelor vii primitive în condițiile carenței enzimelor. De aceea selecția a reținut formele la care caracterul statistic al proteinelor era atenuat prin restrîngerea posibilităților de răspuns la o anumită tripletă de nucleotide. În loc să se realizeze încorporarea statistică a oricărui aminoacid, s-a ajuns la încorporarea mai probabilă a anumitor aminoacizi și, ca urmare, la sinteza unei anumite proteine.

Sinteza unor acizi nucleici cu o anumită secvență de nucleotide, care codifică sinteza anumitor proteine, a însemnat de fapt *apariția primelor gene și a vieții pe Pămînt*. În acest fel s-a constituit *codul genetic*, care a apărut foarte devreme permițînd înregistrarea unei cantități nelimitate de informații, asemenea alfabetului unei limbi, care deși format din relativ puține litere, permite realizarea unor variate și complexe producții literare. Dovadă că originea codului genetic este foarte veche, o constituie universalitatea lui, adică faptul că toate viețuitoarele de pe Pămînt, indiferent de gradul lor de evoluție, folosesc același sistem de înregistrare a informației genetice. Odată apărut, codul genetic n-a mai evoluat deoarece el era suficient de complex pentru a asigura o infinitate de programe genetice.

În ce privește condițiile de mediu care au favorizat evoluția vieții, cea mai marcantă schimbare a constat în compoziția atmosferei : în precambrian atmosfera era lipsită (sau foarte săracă) de oxigen, în schimb conținea azot din abundență, apă, bioxid de carbon și puțin metan. În oceanul primitiv erau dizolvate anumite cantități de hidrogen și de amoniac. Reproducîndu-se în laborator condițiile cît de cît asemănătoare celor de pe Pămîntul primitiv, s-a demonstrat că din substanțele anorganice existente (apă, metan, amoniac, azot,

hidrogen) se pot forma diferite substanțe organice, printre care aminoacizi și derivați ai acizilor nucleici.

Ca sursă de energie, pentru formarea acestor molecule organice a fost folosită lumina solară, incluzînd și porțiunea de radiații ultraviolete din spectru. Treptat, din aminoacizi și din derivați ai acizilor nucleici, s-a ajuns la componentele de bază ale vieții : proteinele și acizii nucleici. Viața a apărut însă numai în momentul cînd s-a produs interacțiunea dintre proteine și acizii nucleici, probabil la un moment dat în precambrianul inferior, acum aproximativ 3,6 miliarde de ani. Primele celule procariote ancestrale posedau un sistem de autoreplicare cu posibilități minime de autoconservare. Selecția a găsit avantajoasă această capacitate de a se reproduce și a ales-o, celulele procariote ancestrale cîștigînd astfel competiția față de întreaga lume organică fără viață (abiotică).

Au rămas de lămurit cîteva probleme privind apariția vieții pe Pămînt. În primul rînd este vorba de sinteza abiogenă a substanțelor organice. Majoritatea cercetărilor consideră că această sinteză a avut loc în mediul acvatic, ducînd la formarea acelei faimoase „supe organice". Iată însă că recent s-a demonstrat experimental că sinteza aminoacizilor și chiar polimerizarea lor poate avea loc și la temperaturi destul de ridicate care nu s-au putut realiza în perioada apariției vieții pe Pămînt decît în lava vulcanilor. S-a găsit astfel un nou leagăn al vieții.

În al doilea rînd, se pune problema cine au apărut mai întîi : proteinele sau acizii nucleici ?

Viața a început cu proteine sau cu acizi nucleici ? La această întrebare se poate răspunde, cum am arătat mai sus, că atît proteinele, cît și acizii nucleici au putut fi sintetizați pe cale abiotică în condițiile existente pe Pămînt acum cîteva miliarde de ani, dar viața n-a putut apărea decît în momentul interacțiunii aces-

tor două grupe de substanţe. O dovadă în acest sens o constituie faptul că cele mai simple forme de viaţă, virusurile, sînt alcătuite din cel puţin un acid nucleic, acid dezoxiribonucleic (ADN), sau acid ribonucleic (ARN) şi o proteină.

SÎNTEM SINGURI ÎN UNIVERS ?

Multă vreme s-a crezut că sîntem singuri pe Terra noastră şi că în univers nu este o altă planetă pe care să existe viaţă. Ultimele decenii însă au schimbat fundamental această concepţie, încît a apărut chiar o ştiinţă nouă denumită *exobiologie* (de la grecescul *exo* care înseamnă în afară, dincolo de) ce se ocupă cu studiul posibilităţii existenţei vieţii în afara Pămîntului.

Întrebarea pe care şi-o pun oamenii de ştiinţă este următoarea : există viaţă pe alte planete ? dacă există, ce forme îmbracă această viaţă ? este vorba de organisme inferioare sau există şi fiinţe raţionale superioare ?

Să vedem care sînt argumentele existenţei vieţii pe alte planete în univers.

În primul rînd, un argument de ordin statistic : în galaxia noastră, numită Calea Lactee, există un număr de peste 150 miliarde de stele, asemănătoare Soarelui. Numai dacă o foarte mică parte din ele au planete care îndeplinesc condiţiile de temperatură, mărime, vechime etc. necesare pentru apariţia şi dezvoltarea vieţii, aceasta înseamnă că numărul de planete pe care pot exista diferite forme de viaţă este de ordinul sutelor de mii sau al milioanelor. În univers există însă miliarde de galaxii, astfel că numărul de planete pe care teoretic poate exista viaţă este de-a dreptul imens.

O a doua categorie de argumente o constituie existenţa unor molecule chimice necesare pentru existenţa

vieţii pe alte planete sau în „vidul" interstelar. În ultimii ani s-a identificat prezenţa a numeroase substanţe organice cu importanţă biologică în mediul interstelar. După cum se ştie, aceste molecule constituie „materia primă" pentru sinteza vieţii, molecule care s-au aflat în atmosfera primitivă a Terrei. Existenţa unor substanţe organice necesare pentru apariţia vieţii a fost semnalată şi în meteoriţii care bombardează mereu Pămîntul.

Recent s-a reuşit, cu ajutorul unui spectrometru special, să se identifice precis existenţa apei pe toţi cei 12 sateliţi ai planetei Jupiter din sistemul nostru solar. Astfel, satelitul Europa al acestei planete este aproape complet acoperit cu gheaţă, iar sateliţii Ganimede şi Calisto sînt acoperiţi cu gheaţă în proporţie de 65% şi respectiv 25%. Pentru prima oară se pune astfel precis în evidenţă existenţa apei pe un alt obiect cosmic din sistemul nostru solar, apă care constituie o condiţie de bază a vieţii.

Iată deci că în univers există condiţii pentru apariţia şi dezvoltarea vieţii. Ţinînd seama de infinitatea universului, se poate afirma că şi viaţa este infinită şi că în funcţie de condiţiile existente pe o planetă sau alta, ea poate atinge grade diferite de dezvoltare. Exobiologii afirmă, se pare pe drept cuvînt, că în univers nu numai că există viaţă, dar există fiinţe raţionale şi chiar civilizaţii tehnice mai dezvoltate ca a noastră.

Cu ocazia unei întîlniri realizate în 1971 la Observatorul astronomic din Biuracan (R. S. S. Armenia) mai mulţi savanţi sovietici şi americani au dat un răspuns pozitiv la întrebarea dacă trebuie ca omul să încerce a primi „mesaje" din alte lumi. Desigur că recepţionarea unor astfel de mesaje prezintă greutăţi considerabile, însă oamenii de ştiinţă afirmă că merită să se facă eforturi în acest sens.

Pe de altă parte, recent s-a formulat ipoteza că Terra noastră a fost vizitată în timp de ființe raționale extraterestre. Stau mărturie pentru aceste evenimente unele desene preistorice de pe pereții unor peșteri, existența unor „rampe de lansare" în diferite regiuni ale lumii, precum și unele povești biblice care, reinterpretate, au dus la concluzia că distrugerea Sodomei și Gomorei ar fi fost provocată prin explozia nucleară a unei nave extraterestre.

Deocamdată nu se pune problema organizării unor călătorii cosmice pentru a lua legătura cu civilizații dintr-un alt sistem solar. S-a calculat, de pildă, că cea mai apropiată stea se află la 4,3 ani lumină de sistemul nostru solar. Pentru a putea fi vizitată cu o navă cosmică ce ar dezvolta o viteză de 8 km/s, ar fi nevoie de 80 de mii de ani, ceea ce, evident, constituie o imposibilitate.

Cercetările exobiologilor moderni vin în sprijinul ideii că viața, formă superioară de organizare a materiei, poate apărea peste tot unde există condiții favorabile. Universul fiind infinit, se poate spune că și viața este infinită, pe diferite corpuri cerești cu condiții prielnice apariției și dezvoltării ei. Ca urmare, în univers pot exista și ființe raționale similare celor de pe Terra, astfel că, probabil, noi nu sîntem singuri. Studiile recente de biochimie, biofizică, genetică, biologie moleculară, exobiologie etc. demonstrează originea materială a vieții și, evident, posibilitatea existenței sale pe alte planete.

ESTE POSIBILĂ SINTEZA MATERIEI VII ?

În sprijinul concepției expuse privind apariția vieții stau astăzi o multitudine de date experimentale. Astfel, s-a demonstrat în laborator că este posibilă sinteza abiotică (în absența vieții) a unor substanțe organice, cum sînt aminoacizii, bazele azotate, unele nucleotide și chiar tipuri mai simple de polinucleotide și polipeptide. Iată, deci, că cercetătorii au putut să reproducă în laboratoare unele momente din procesul de apariție a vieții.

Descoperirea recentă în spațiul interplanetar a unor cantități relativ mari de substanțe organice vine în sprijinul teoriei că viața a apărut pornind de la substanțe organice mai simple, sintetizate inițial pe cale abiogenă. De asemenea, această descoperire vine în sprijinul ipotezei că probabil există viață și pe alte planete, acolo unde sînt condiții favorabile pentru apariția și menținerea sa. Așa cum universul este infinit, se poate admite că și viața este infinită, numai că — în funcție de condițiile de mediu respective — ea poate îmbrăca forme foarte variate.

În ultimii ani geneticienii au reușit izolarea și sinteza artificială a unor gene, adică a unor secvențe de nucleotide care determină sinteza unei secvențe de aminoacizi, respectiv de polipeptide. De asemenea, s-a reușit sinteza artificială a unor virusuri existente care prezintă chiar capacitate infecțioasă.

În anul 1969 profesorul John Beckwith și colaboratorii săi de la Universitatea Harward din Statele Unite au reușit să izoleze o genă de la bacteria *Escherichia coli*, iar în 1970 o echipă de cercetători conduși de profesorul G. Khorana de la Institutul de Tehnologie din Massachusets (S.U.A.) a realizat sinteza artificială a unei gene de la drojdia de bere.

În ultimii ani s-a realizat sinteza și a altor gene similare, nu numai a celor de la virusuri și bacterii, dar chiar de la animale evoluate, cum sînt mamiferele. Astfel, geneticianul D. Agarwal (1972) a sintetizat artificial o genă bacteriană, iar cercetătorul A. Efstradiatis (1975) și echipa sa de la Universitatea Harvard au sin-

tetizat artificial genele care intervin în sinteza hemoglobinei la iepure. În sfîrşit, în 1976 o echipă de cercetători de la Institutul de chimie organică şi biochimie din Hamburg, condusă de Hubert Köster, a sintetizat — după trei ani de încercări — gena umană care determină sinteza hormonului angiotensina II.

După cum se ştie, virusurile sînt forme foarte simple de viaţă, alcătuite dintr-un singur acid nucleic (ADN sau ARN) şi proteine. Recent profesorul Arthur Kornberg şi colaboratorul său Mehran Goulian de la Universitatea Stanford din California au reuşit să sintetizeze artificial genele şi cromozomul bacteriofagului * ϕ X 174 (fig. 5). Acest virus este extrem de mic şi nu conţine decît o cantitate redusă de ADN format dintr-o secvenţă de 5375 nucleotide care alcătuiesc 9 gene. Cei doi cercetători au sintetizat *in vitro* ADN viral, folosind în acest scop o mică cantitate de ADN viral la care s-au adăugat cele 4 tipuri de nucleotide care conţineau adenină, timină, guanină şi citozină, la care s-au adăugat diferite enzime, cum sînt ADN-polimeraza care asigură polimerizarea nucleotidelor şi ligaza care leagă capetele macromoleculei de ADN pentru a forma structura circulară caracteristică cromozomului viral. S-a constatat că ADN-ul viral sintetizat artificial este identic cu cel natural, încît folosit pentru infectarea unor bacterii, el a dovedit că are capacitate infecţioasă, că se poate înmulţi în interiorul celulei gazdă şi că poate să determine sinteza învelişului proteic (capsida). Noile particule virale eliberate prin liza celulei bacteriene erau identice cu virusul ϕ X 174.

Progrese importante s-au realizat şi în sinteza artificială a unor proteine, cum este de pildă insulina

* Virus al bacteriilor.

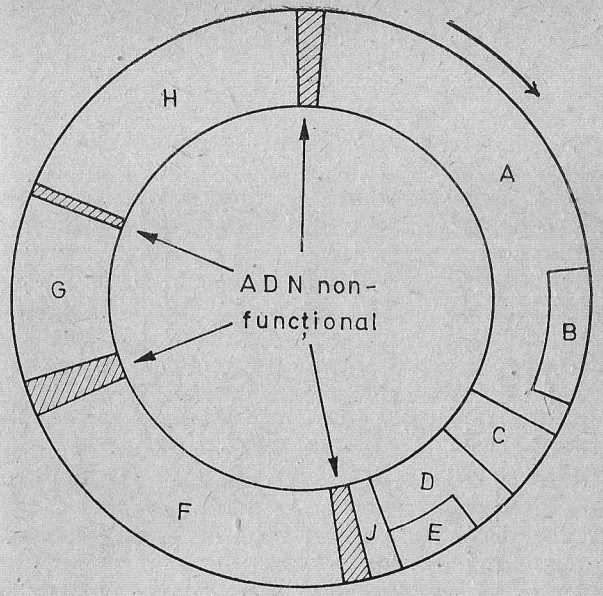

Fig. 5 — Cromozomul circular al bacteriofagului ØX 174 este alcătuit din 9 gene notate cu primele litere ale alfabetului şi o mică cantitate de ADN non-funcţional.

(fig. 6). Toate aceste cercetări demonstrează clar că nu sîntem departe de momentul cînd vom putea sintetiza artificial forme simple de materie vie.

Cercetările moderne de biochimie, biofizică, genetică, biologie moleculară etc. demonstrează astfel convingător că viaţa nu are nimic misterios în ea, că nu este de origine supranaturală, ci că a luat naştere în timp, în condiţii favorabile, sub influenţa unor fenomene naturale care pot fi tot mai bine cunoscute şi chiar reproduse în laborator.

Fig. 6 — Structura moleculei de insulină, alcătuită din două lanțuri formate din 21 și 30 aminoacizi și legate între ele prin două punți disulfidice.

PRIMELE CELULE PROCARIOTE ȘI EVOLUȚIA LOR

De la început celulele procariote ancestrale, de tip anaerob, au avut cîteva trăsături esențiale ale vieții: ca și astăzi, secvențe de 3 baze în ADN au determinat ordinea de succesiune a aminoacizilor în proteine, deci sinteza proteică se baza pe același cod genetic. Proteinele și acizii nucleici, necesari pentru reproducere se formau în urma unor reacții fermentative (anaerobe) ale moleculelor mai mici, ca lactatul și acetatul. Aceste componente reproductibile (acizii nucleici și proteinele) incluse într-o membrană lipidică au format *primul sistem celular*. Probabil chiar la începutul evoluției celulare au fost produse — pe baza elementelor chimice existente în mediu — molecule de ATP (adenozintrifosfat) (fig. 7), una dintre cele patru nucleotide din acizii nucleici, cu rol central în energetica celulară. De asemenea, celulele primitive aveau capacitatea de a folosi diferite substanțe organice pentru a sintetiza riboza, dezoxiriboza, fosfații, derivații purinici și pirimidinici, aminoacizii, sărurile, necesare pentru activitatea lor metabolică.

Odată format acest procariot heterotrof primitiv, în el încep să se dezvolte și să se perfecționeze principalele căi biosintetice: capacitatea de a fixa CO_2 și azotul atmosferic, de a sintetiza derivați porfirinici. Astfel, din ancestorul capabil de a sintetiza porfirine și, în consecință, de a absorbi lumina vizibilă au rezultat microorganisme fotosintetizatoare primitive anaerobe de tip bacterian care sintetizau clorofila. Acești fotosintetizatori primitivi, capabili de a fixa CO_2, aveau și capacitatea de a produce ATP-ul prin absorbția luminii vizibile cu ajutorul porfirinelor. De asemenea, fotosinteza fiind de tip anaerob, pentru reducerea CO_2 nu erau folosiți atomi de hidrogen din apă, ci

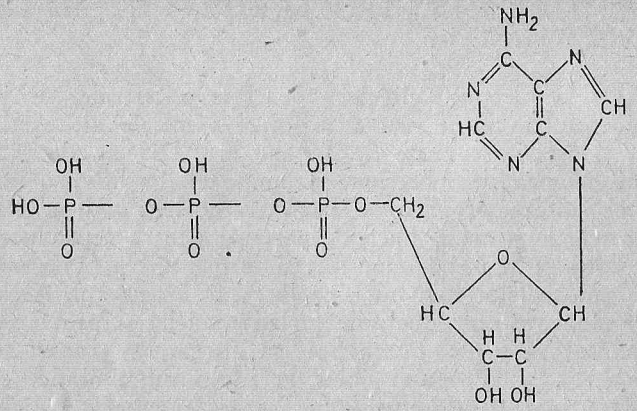

Fig. 7 — Structura adenozintrifosfatului (ATP).

din mici molecule organice sau din hidrogen sulfurat. Momentul trecerii la folosirea apei ca donor de hidrogen pentru reducerea CO_2 constituie un pas mutațional important în evoluția procariotelor. Astfel, cu circa 2300 de milioane de ani în urmă, se realizează trecerea de la bacteriile fotosintetizatoare anaerobe, care reduc CO_2 și fixează azotul, la strămoșii algelor albastre-verzi. Pentru acestea sursa de apă devine indispensabilă, iar ca rezultat al fotosintezei se elimină în aer oxigenul. Încep să se acumuleze cantități importante de oxigen și se ajunge astfel ca la începutul cambrianului atmosfera să nu difere de cea de astăzi în privința procentului de oxigen liber.

Argumente care vin în sprijinul acestei concepții privind apariția și evoluția primelor viețuitoare sînt rezultatele cercetărilor microfosilelor, provenite din localitatea Figtree din sudul Africii. Printre primele microfosile studiate la microscop au fost observate două specii cu o frecvență mai mare. Astfel, este mai întîi

vorba de niște celule sferice de tip bacterian care au fost denumite *Eobacterium isolatum* și apoi de niște celule similare algelor albastre-verzi, care au primit numele de *Archaeosphaeroides barbertonensis*. Analiza reziduurilor organice găsite în straturile respective a dus la identificarea unor hidrați de carbon produși cu ajutorul clorofilei, pigmentul verde care se găsește și azi în plante. Se știe că plantele actuale în cursul fotosintezei preferă carbonul-12 în locul carbonului-13 și ca atare în hidrații de carbon există un anumit raport între ^{12}C și ^{13}C. Același raport a fost găsit și în hidrații de carbon sintetizați de celulele procariote respective acum 3,2 miliarde de ani.

Straturi bogate în microfosile au fost identificate și în America de Nord, în localitatea Gunflint, de-a lungul țărmului Lacului Superior, în regiunea Ontario. Aceste microfosile au circa 2 miliarde de ani vechime și unele seamănă foarte bine cu algele albastre-verzi actuale. Erau celule de tip procariot, capabile să realizeze fotosinteza.

În ultima perioadă a precambrianului, odată cu acumularea de O_2 în atmosferă, procariotele răspund diferit la această schimbare esențială a mediului. Unele supraviețuiesc, deci se adaptează, iar altele nu. Mai întîi oxigenul a fost tolerat și de-abia după aceea folosit în procesul respirației aerobe. Grupurile procariotice, ca mixomicetele și actinomicetele, devin aerobe obligatorii. Altele, cum sînt unele bacterii (clostridii), răspund acestor condiții prin formarea de spori.

Algele albastre-verzi au continuat să supraviețuiască din precambrian pînă în zilele noastre. Se pare că precambrianul timpuriu a fost vîrsta microbilor anaerobi, iar precambrianul tîrziu, vîrsta microbilor aerobi, a algelor albastre-verzi.

Un grup de cercetători de la Universitatea din Illinois (S.U.A.), condus de profesorul Carol Woese, a desco-

perit recent un grup relict de *microorganisme* denumite *metanogene*, similare ca mărime cu bacteriile, dar care prezintă o seamă de deosebiri majore faţă de acestea. Astfel, ele au o structură complet diferită a membranei celulare şi folosesc bioxidul de carbon şi hidrogenul pentru a produce metanul, de unde şi denumirea lor. Deoarece trăiesc în absenţa oxigenului, ele sînt considerate un grup aparte de vieţuitoare, de origine foarte veche. După cum se admite în prezent, primele forme de viaţă au apărut pe Pămînt acum circa 3,6 miliarde de ani, în condiţiile unei atmosfere lipsite de oxigen liber. Ca urmare, se apreciază că metanogenele aparţin unei linii evolutive foarte vechi, denumită *arhebacterii*, ele precedînd ca origine cele mai simple bacterii.

CELULA EUCARIOTĂ, UN MARE PAS ÎNAINTE ÎN EVOLUŢIA VIEŢUITOARELOR

Apariţia celulelor de tip eucariot, deci care prezentau un nucleu adevărat, a însemnat un mare pas înainte în evoluţia vieţii pe Pămînt. Se ştie că, peste 99% dintre speciile actuale, incluzînd totalitatea plantelor şi animalelor, sînt alcătuite din celule de tip eucariot. Să vedem mai întîi care sînt caracteristicile celulelor de tip eucariot şi prin ce se deosebesc de celulele procariote :

Procariote	Eucariote
— Nu au nucleu, ci numai un nucleoid.	— Au nucleu înconjurat de membrană nucleară.
— Cromozomul reprezentat de o moleculă de ADN.	— Cromozomii sînt mai numeroşi şi complexaţi cu histone, proteine nonhistonice, ARN etc.
— Celulele sînt mai mici, cele mai complexe procariote fiind filamentoase sau miceliate.	— Celulele mai mari, majoritatea speciilor fiind pluricelulare. Cele mai evoluate sînt animalele vertebrate şi plantele cu flori.
— Diviziunea celulară directă, mai ales fisiunea binară.	— Diviziunea celulară se realizează prin mitoză * şi cu ajutorul aparatului mitotic.
— Sexualitatea absentă sau sub formă mai simplă (parasexualitate).	— Reproducerea sexuată se realizează cu ajutorul gameţilor produşi prin meioză *.
— Forme anaerobe, facultativ anaerobe sau aerobe.	— Toate formele sînt aerobe, adică necesită O_2 pentru a trăi.
— Fotosinteza se realizează cu ajutorul unor cromatofori prinşi de membrana celulară. Cloroplastele absente.	— Fotosinteza se realizează cu ajutorul cloroplastelor.
— Respiraţia cu ajutorul unor enzime din membrana celulară.	— Respiraţia, cu ajutorul unor organite denumite mitocondrii.

Celulele procariote nu au deci nucleu organizat, nu posedă forme evoluate de înmulţire (mitoză şi meioză), iar materialul genetic este repartizat în toată citoplasma şi se cheamă *nucleoid*.

Celulele eucariote, mai evoluate, au nucleul înconjurat de membrană nucleară, au diviziune mitotică şi meiotică, au mai mulţi cromozomi, a căror formă şi structură constituie o caracteristică de specie. Din tabe-

* La eucariote diviziunea celulară se realizează prin mitoză şi meioză. Astfel prin *mitoză* se realizează celule fiice cu acelaşi număr de cromozomi cu celulele mamă, iar prin *meioză* se produc celule sexuale cu un număr de cromozomi redus la jumătate.

lul de mai sus reiese că există şi alte deosebiri importante între cele două tipuri de celule, fapt care demonstrează că trecerea de la procariote la eucariote a însemnat unul dintre cele mai importante momente ale evoluţiei vieţii pe Pămînt.

Numeroase cercetări de geologie, geochimie, paleobiologie, mai ales din ultimii ani, au reuşit să identifice cu aproximaţie epoca apariţiei primelor celule eucariote. Astfel, s-a descoperit că trecerea de la viaţa anaerobă la cea aerobă marchează momentul apariţiei primelor celule eucariote, care sînt în exclusivitate aerobe. Acestea nu puteau să se dezvolte deci decît într-o atmosferă bogată în oxigen ; pe scara geologică a timpului, aceasta ar însemna acum aproximativ 1800—2000 milioane de ani (precambrianul mijlociu). Cele mai vechi structuri asemănătoare celulelor eucariote unicelulare datează de acum 1 500 milioane de ani, fiind date de dolomiţii din nordul Australiei. În aceste celule, studiate la microscop, au fost identificate nucleul şi aparatul mitotic. De asemenea, microorganisme eucariote, probabil alge unicelulare şi ciuperci, au fost descrise în formaţiunile geologice de la Alice Springs din Australia centrală, avînd o vîrstă de aproximativ un miliard de ani.

Ceea ce i-a intrigat întotdeauna pe paleontologi a fost faptul că în precambrian nu au fost găsite niciodată macrofosile eucariote multicelulare. Acestea apar, deodată, ca o explozie, numeroase şi foarte diferite (protozoare, alge macroscopice) la începutul cambrianului, adică cu 700—600 milioane de ani în urmă. Deci de la apariţia primelor celule eucariote (1 800 milioane de ani în urmă) şi pînă la apariţia primelor eucariote complexe, macroscopice (600 milioane de ani în urmă) s-a scurs peste un miliard de ani, timp în care, probabil, celulele nucleate au fost în plină evoluţie. De ce a fost necesară o perioadă aşa de lungă nu se ştie încă, dar

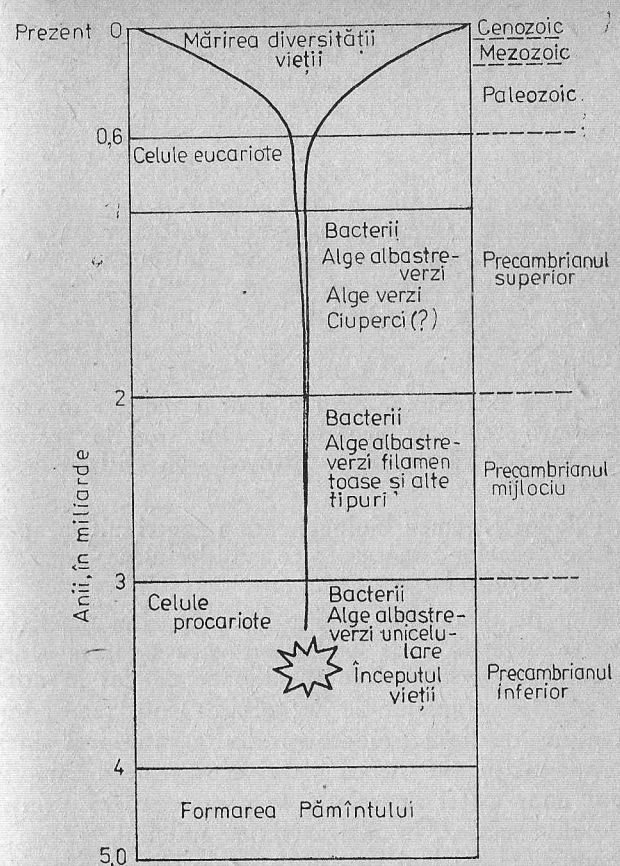

Fig. 8 — Momentele mai importante privind apariţia şi evoluţia vieţii pe Pămînt.

se pare că un rol important în apariţia eucariotelor macroscopice, pluricelulare, l-au avut dezvoltarea sexualităţii şi apariţia protistelor consumatoare.

Reproducerea asexuată prin mitoză oferă organismelor posibilitatea de a se înmulți, dar variabilitatea este redusă la minimum, mutațiile fiind foarte rare ; cele două celule fiice ce rezultă din mitoză sînt copii identice ale celulei mame.

Odată cu *apariția reproducerii sexuate prin meioză* la eucariote, posibilitățile de evoluție sînt mult mai mari și mai rapide. Organismele rezultate din meioză sînt mult diversificate, deoarece ele întrunesc trăsături care se combină diferit de la ambii părinți, iar șansa apariției și conservării mutațiilor este mai mare. Așadar, *selecția*, a cărei rezultantă este *evoluția*, acționează pe un material mai bogat și mai diversificat.

Se pune întrebarea, cînd a apărut meioza în cursul dezvoltării celulelor eucariote ? Din studiile realizate recent se pare că meioza a apărut cu un miliard de ani în urmă.

Al doilea fenomen biologic care a contribuit la apariția organismelor macroscopice multicelulare este *dezvoltarea protistelor consumatoare.*

Golul de timp care rămîne între apariția meiozei și apariția explozivă de organisme macroscopice de la începutul cambrianului (600 milioane de ani în urmă) pare să fie completat de dezvoltarea unor relații între organisme de tipul prădător-pradă în interiorul diferitelor populații. Se știe că astăzi ecosistemele, care sînt sediul unor astfel de relații, se caracterizează printr-o mare diversitate. Cu alte cuvinte, aplicînd aceasta la precambianul cel mai recent, se poate bănui că majoritatea microorganismelor cunoscute din această perioadă, fiind producători primari fotosintetici și achiziționînd meioza ca proces evolutiv, s-au diversificat foarte mult și ca urmare au apărut tipuri noi. De asemenea, se poate presupune că unele dintre ele pierzînd, prin mutații, posibilitatea de fotosinteză, au devenit primii consumatori. Astfel, protistele unicelulare de acest tip se hrăneau cu resturi organice și celule mici (erau omnivore). Apar apoi consumatori mai complecși, modificați morfologic : erbivorele și carnivorele. Dezvoltarea acestor relații la protozoare duce la diversificarea bazei nutritive, cît și la evoluția rapidă și simultană a consumatorilor macroscopici (nevertebratele) și a organismelor consumate (de regulă algele pluricelulare).

Iată care sînt principalele evenimente din precambrian care au dus la apariția celulelor procariote și apoi eucariote :

Evoluția vieții în precambrian	Vîrsta aproximativă (în milioane de ani)
— Originea ființelor macroscopice	600—700
— Dezvoltarea protistelor consumatoare (prădătoare)	800
— Dezvoltarea sexualității prin meioză	1000
— Originea celulelor nucleate cu mitoză	1500
— Apariția atmosferei cu oxigen	2000
— Răspîndirea microorganismelor producătoare de oxigen (alge albastre-verzi)	2300
— Cele mai vechi microfosile	3200
— Cele mai vechi roci sedimentare cunoscute	3600
— Formarea Pămîntului	4500—5000

Este dificil de răspuns la întrebarea cînd au apărut celulele eucariote, totuși diferitele cercetări efectuate asupra fosilelor pot data aproximativ perioada cînd au avut loc principalele evenimente biologice care au marcat formarea celulelor eucariote. Astfel de studii nu pot stabili însă dinamica acestor procese și deci nu pot răspunde la întrebarea : cum s-au format primele celule eucariote și cum au evoluat ele în principalele grupe mari de organisme vii, plante și animale.

ORIGINEA CELULELOR EUCARIOTE

Pentru a putea răspunde la această întrebare să prezentăm mai întîi punctele de vedere comune ale oamenilor de ştiinţă privind evoluţia eucariotelor. În prezent toată lumea este de acord cu dicotomia organismelor vii în cele două grupe mari : procariote şi eucariote.

Încă din anul 1925, zoologul H. Chatten a definit deosebirile esenţiale dintre celulele procariote şi eucariote. Se ştia că aceste două tipuri celulare reprezintă stadii diferite în organizarea şi diferenţierea materialului genetic.

Stabilirea şi diferenţierea sumară, dar esenţială, a celor două tipuri celulare au avut serioase implicaţii în clasificarea organismelor vii. De unde pînă recent lumea vie era împărţită în „Plante şi Animale", iar grupuri mari de microorganisme, cum sînt bacteriile, erau dificil de inclus într-un grup sau altul, pe baza acestor cunoştinţe toate organismele vii sînt în prezent clasificate fără echivoc în Procariote şi Eucariote.

Modul cum s-a realizat evoluţia de la procariotele mai simple la eucariotele mai complexe, avînd în vedere enorma discontinuitate structurală şi funcţională dintre ele, constituie un motiv de discuţii între oamenii de ştiinţă.

Concepţia clasică, de fapt cea mai răspîndită, susţine că eucariotele au evoluat din procariote prin mutaţii şi selecţie. Astfel, bacteriile fotosintetizatoare primitive ar fi evoluat treptat în alge şi plante iar apoi acestea, prin pierderea fotosintezei, au dat naştere la ciuperci şi la animale. Acest *mit botanic*, cum a fost denumit, susţine deci originea monofiletică a tuturor organismelor eucariote, din strămoşi procariotici, mecanismul major fiind mutaţia şi selecţia.

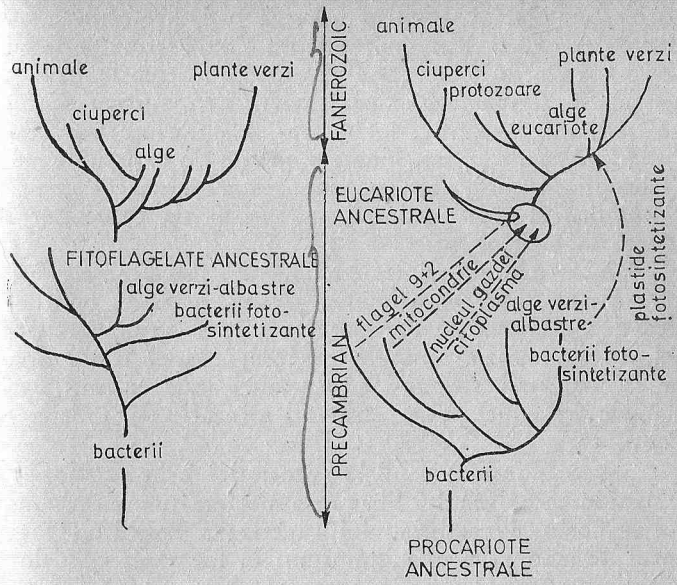

Fig. 9 — „Mitul botanic" ce susţine că eucariotele au apărut prin mutaţii şi selecţie (stînga) şi teoria simbiotică (dreapta).

Punctul slab al acestei concepţii clasice constă în incapacitatea de a explica atît discontinuitatea enormă de structură şi funcţii dintre celulele procariote şi cele eucariote existente, cît şi discontinuitatea fosiliferă. Presupunerea că ar fi existat un tip de celulă intermediar între pro- şi eucariote, *fitoflagelatul Uralga*, care neadaptîndu-se a dispărut, nu a putut fi dovedită. Aceasta arată încă odată că numai prin mutaţii şi selecţie este dificil de explicat formarea şi evoluţia celulelor eucariote.

În ultimii ani însă, datorită descoperirilor moderne din domeniul geologiei, paleontologiei, biochimiei, bio-

logiei celulare, geneticii și microscopiei electronice, s-a demonstrat că această concepție nu mai corespunde întru totul faptelor. Ca urmare a apărut o nouă teorie, bazată pe un bogat material experimental, care susține că un rol major în trecerea de la pro- la eucariote l-a avut *endosimbioza*, sau mai bine zis o serie de endosimbioze. Concepția aceasta mai poartă denumirea și de *teorie simbiotică* și este susținută în special de cercetătorul american L. Margulis.

Ideea simbiozei, privită ca unul din mecanismele majore ale evoluției eucariotelor, susține originea polifiletică a organismelor superioare (plante și animale). Astfel, toate celulele animale conform teoriei simbiotice, ar fi avut trei strămoși procariotici independenți, iar celulele vegetale patru strămoși procariotici independenți.

Cum s-au format celulele eucariotice prin simbioză ? Acumularea oxigenului liber în atmosfera precambrianului mijlociu și cambrianului superior a constituit factorul de mediu cel mai important în formarea celulelor eucariote. Astfel, materia organică abiotică, folosită pe scară largă în metabolismul celular, a încetat să se mai producă în prezența oxigenului și, drept consecință, microorganismele existente încep să depindă unele de altele pentru nutriție, protecție, săruri și multe alte elemente necesare asigurării reproducerii. Între diferitele tipuri de microbi încep să se dezvolte relații de simbioză, parazitism, asociație și răpitor-pradă.

Potrivit teoriei simbiotice, eucariotele au luat naștere printr-o serie specifică de endosimbioze. Să vedem care este succesiunea evenimentelor care au dus la apariția celulelor eucariote. În conformitate cu teoria simbiozei, celula eucariotă a apărut în 3 etape (fig. 10).

În prima etapă prin simbioza dintre două monere, o bacterie procariotă aerobă (protomitocondrie) și o gazdă mai mare, probabil o bacterie heterotrofă ana-

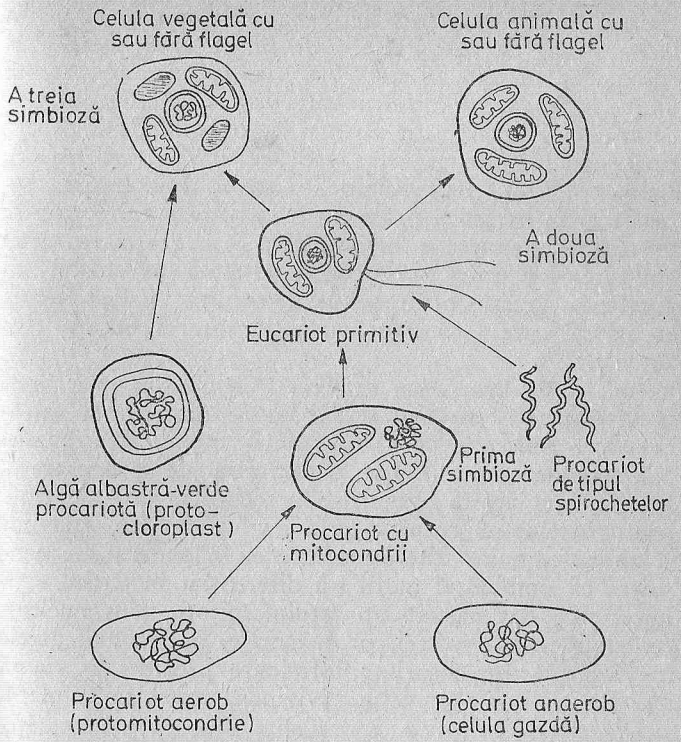

Fig. 10 — Cele 3 simbioze care au dus la apariția diferitelor tipuri de celule eucariote (după L. Margulis).

erobă, a rezultat un organism amoeboid cu mitocondrii. Aceasta datorită faptului că bacteria aerobă a evoluat spre mitocondrie, iar gazda sa spre amoebă, astfel că au apărut populații de celule aerobe mai mari.

Toate organismele vii ar avea deci un strămoș comun reprezentat de un procariot heterotrof, care conținea codul genetic actual, fiind deci capabil de sinteza pro-

teică. Prin mutații și selecție naturală, au rezultat diferite tipuri de procariote, care inițial erau toate anaerobe. Pentru reducerea CO_2 acestea utilizau hidrogenul atmosferic sau din diferiți compuși, ca hidrogenul sulfurat etc. Prin mutații au apărut probabil alte procariote capabile să utilizeze hidrogenul din apă pentru reducerea CO_2 și să elimine oxigenul. Îmbogățirea atmosferei în oxigen a provocat o adevărată criză printre procariotele anaerobe heterotrofe. Prin realizarea unei endosimbioze între o bacterie mutantă aerobă și un procariot heterotrof anaerob a rezultat prima celulă eucariotă, care a devenit strămoșul tuturor eucariotelor actuale.

În a doua etapă s-a realizat o nouă simbioză între acest organism eucariot și o bacterie din grupul spirochetelor, fenomen care a conferit mobilitatea gazdei amboeboide și i-a mărit capacitatea de procurare a hranei. Din aceste organisme amoeboflagelate de tipul protozoarelor au rezultat prin evoluție grupul fungilor și animalelor, iar ulterior plantele. În general, se consideră că simbiontul motil s-a diferențiat în cursul evoluției și a dat naștere aparatului mitotic (fus nuclear, centrioli etc.). Dealtfel, protozoarele, unii fungi, algele nucleate și alte eucariote inferioare prezintă o seamă de variații în ce privește diviziunea mitotică celulară.

Diviziunea mitotică a celulelor (fig. 11) și apariția ulterioară a meiozei au constituit pași uriași înainte în evoluția organismelor, deoarece în acest fel natura a descoperit calea pentru o echilibrată distribuție a genelor în celulele fiice, pentru recombinarea genelor și mărirea variabilității genetice a organismelor, pentru producerea de celule sexuale haploide etc. În timp ce celulele obișnuite ale organismelor au un număr dublu de cromozomi ($2n$) comparativ cu cele sexuale, acestea au un număr de cromozomi redus la jumătate (n). Prin fecundarea a două celule sexuale se restabilește numărul

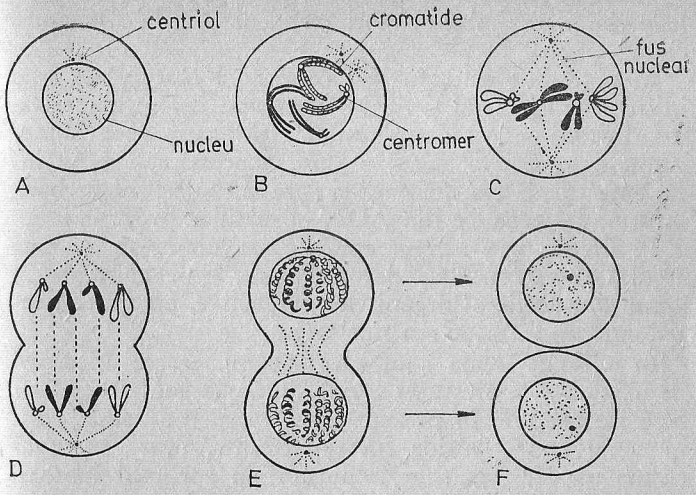

Fig. 11 — Fazele diviziunii mitotice ale unei celule eucariote care conține două perechi de cromozomi: interfază (A), profază (B), metafază (C), anafază (D), telofază (E) și cele două celule fiice în interfază (F).

de cromozomi caracteristic speciei. Pe măsură ce diviziunea mitotică s-a perfecționat, a devenit posibilă apariția celorlalte trei regnuri : fungi, animale și plante.

În sfîrșit, în etapa a treia a avut loc o nouă simbioză, a amoeboflagelatului cu o algă fotosintetizantă, care a devenit un organit bine cunoscut : cloroplastul, caracteristic pentru plantele verzi. A apărut astfel regnul reprezentat de plante.

În sprijinul ipotezei simbiozei în evoluția de la procariote la eucariote, există mai multe argumente importante. În primul rînd, în organitele celulei eucariote, de tipul mitocondriilor și cloroplastelor, a fost identificat material genetic (ADN), care se prezintă sub formă de nucleoid, similar cu ADN-ul bacterian. Cantitatea de ADN per organit este similară cu cea dintr-o celulă

bacteriană, în ambele cazuri ADN-ul avînd o structură circulară.

În al doilea rînd, în mitocondrii și cloroplaste s-au identificat ribozomi și ARN-ribozomal de tip bacterian, diferit net de cel citoplasmatic. De asemenea, în organitele respective există o sinteză proteică, relativ independentă de cea nucleară și care se realizează pe baza informației genetice din ADN-ul circular propriu.

În sfîrșit, un alt argument îl constituie existența unei ereditățI extranucleare datorată unor gene existente în aparatul genetic al organitelor respective, ereditate relativ independentă de cea nucleară.

În ultima vreme s-au efectuat numeroase încercări de a izola și a crește *in vitro* diferite organite celulare. Se pare că pînă în prezent acest lucru n-a reușit decît în cazul unor plastide fotosintetizante, fapt care constituie un alt argument important în sprijinul ipotezei originii endosimbiotice a celulelor eucariote.

Un alt argument în favoarea aceleiași ipoteze îl constituie faptul că există virusuri care parazitează selectiv anumite organite celulare. Astfel, virusul mozaicului galben al napului (*Turnip Yelow Mosaic Virus*) infectează exclusiv cloroplastele plantei, în timp ce nucleul celular, mitocondriile și alte organite celulare rămîn neafectate.

Deși aparatul genetic nuclear reprezintă aproximativ 99% iar cel extranuclear numai 1% din totalitatea ADN celular, totuși viața celulelor eucariote nu este posibilă în afara acestor endosimbioze. De pildă, mitocondriile au un rol major în furnizarea energiei metabolice prin respirație, iar cloroplastele în transformarea energiei solare în energie chimică prin fotosinteză.

O altă ipoteză privind originea celulelor eucariote este cea a *invaginării membranei celulare* (fig. 12). Pornind de la observația că în celulele procariote cromozomul este atașat membranei celulare, s-a emis ipoteza că prin invaginarea membranei s-au format organitele

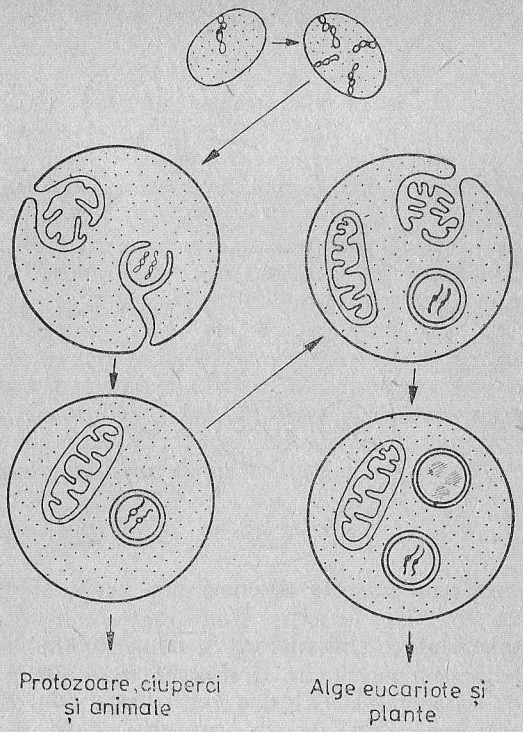

Fig. 12 — Originea celulelor eucariote prin invaginarea membranei celulare.

celulare de tipul mitocondriilor și cloroplastelor, precum și nucleul celular. Un argument în sprijinul acestei ipoteze este faptul că toate structurile celulare sînt prevăzute cu o membrană dublă.

Prima invaginare a membranei celulare ar fi dus la separarea genomului nuclear și a celui mitocondrial, astfel luînd naștere celulele eucariote specifice protozoare-

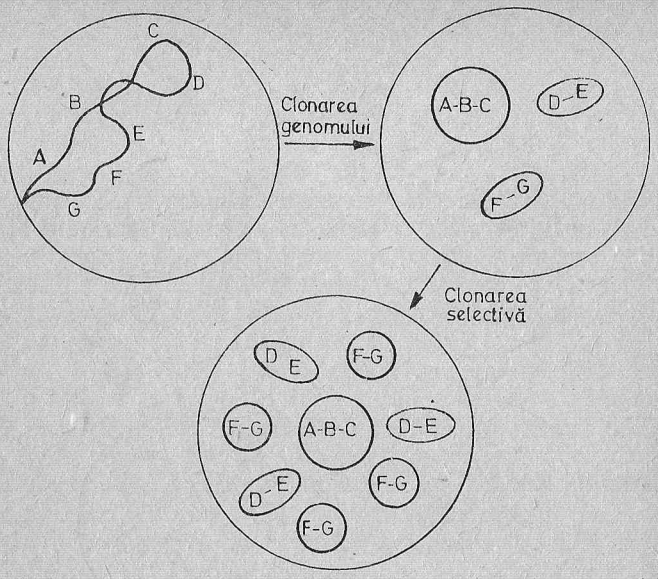

Fig. 13 — Originea celulelor eucariote prin clonarea genomului.

lor, ciupercilor şi animalelor. A doua invaginare, care s-a produs mai tîrziu, ar fi determinat apariţia cloroplastelor caracteristice algelor eucariote şi plantelor.

Forma ancestrală de tip procariot care a permis această evoluţie a fost, probabil, o bacterie aerobă la care s-a produs o duplicare a genomului, anterior invaginării membranei celulare. Acest fenomen este curent la procariote, şi legat de înmulţirea celulelor.

Ipoteza *clonării genomului* (fig. 13) susţine că la procariotele ancestrale, genele care determină anumite funcţii celulare s-au separat şi multiplicat relativ independent de cromozomul celulei. Aceasta înseamnă că genomul respectiv al celulelor procariote s-a fragmentat, cele mai multe gene rămînînd în cadrul nucleului,

o parte din ele au dat naştere mitocondriilor şi o alta, cloroplastelor.

Evident, este dificil de cunoscut exact mecanismul prin care s-a realizat trecerea de la celula procariotă, mai primitivă, la celula eucariotă, mai evoluată. Cert este că această trecere a însemnat unul dintre cele mai importante evenimente biologice din cadrul evoluţiei vieţuitoarelor.

Analizînd în ansamblu concepţiile despre originea şi evoluţia lumii vii, se poate conchide că ele s-au schimbat în funcţie de nivelul de cunoştinţe al epocii respective. Realizările importante din ultima vreme ale biochimiei, biofizicii, geneticii, biologiei celulare şi moleculare etc. au determinat apariţia unor noi ipoteze şi teorii privind originea vieţii pe Pămînt, a organismelor procariote şi eucariote, care îmbogăţesc şi aprofundează concepţia noastră generală despre viaţă.

PLANTE, ANIMALE ŞI MAI CE ?

Din momentul apariţiei sale pe Pămînt, acum circa 3,6 miliarde de ani, la începutul erei precambriene, viaţa a suferit un proces continuu de evoluţie, de diversificare, prin care au apărut numeroase specii existente în prezent sau care au apărut şi dispărut de-a lungul timpului.

Pe baza cercetărilor privind structura şi funcţiile diferitelor specii, mecanismele lor de creştere, dezvoltare şi reproducere, materialul lor genetic şi evoluţia lor istorică, organismele vii au fost clasificate în grupe mai mici sau mai mari, într-o anumită ierarhie. Ştiinţa biologică care se ocupă cu clasificarea organismelor poartă numele de taxonomie. Concepţiile privind clasificarea organismelor au evoluat, mai ales în ultimii ani, astfel că împărţirea lumii vii în plante şi animale nu mai corespunde în bună măsură. De ce ?

În primul rînd, pentru că sînt unele organisme, ca de pildă bacteriile, care nu pot fi considerate nici plante, nici animale. Ele sînt altceva.

În al doilea rînd, sînt unele organisme unicelulare flagelate care pot fi considerate la fel de bine plante sau animale.

Desigur că pentru organismele mai evoluate, cum este de pildă mărul și cîinele, nu există dificultăți în a le categorisi plantă sau animal. În schimb, pentru organismele primitive, în special unicelulate, cum este *Euglena* sau *Volvox*, există dificultăți reale de a le clasifica. Aceasta pentru că unele dintre ele posedă atît caracteristici ale animalelor, cît și ale plantelor. Pe baza cunoștințelor actuale privind evoluția vieții pe Pămînt, clasificarea organismelor în plante și animale este prea simplă și nu corespunde realizărilor moderne ale biologiei.

Pentru a rezolva problemele puse de taxonomia modernă în ultima vreme, mai ales pe baza cercetărilor de biologie și genetică moleculară, s-a ajuns la concluzia că lumea vie este mai bine să fie clasificată în două grupe mari care nu pot fi confundate : *procariote* și *eucariote*.

Prin *procariote* (pronucleare) se înțeleg acele organisme, de obicei foarte mici, care nu prezintă nucleu și membrană nucleară, ci un nucleoid fără membrană, în care materialul genetic este organizat într-un singur cromozom, de obicei de formă circulară, și care este alcătuit exclusiv din ADN sau ARN în cazul unor ribovirusuri (vezi fig. 15). Înmulțirea lor se realizează cel mai adesea prin fisiune binară neexistînd fus mitotic și centrioli, ADN-ul cromozomal nu se colorează prin reacția Feulgen, iar mitocondriile și cloroplastele lipsesc. Din procariote fac parte numeroase microorganisme, cum sînt : bacteriile, unele alge, precum și virusurile.

Organismele *eucariote* (nucleate adevărate) prezintă nucleu prevăzut cu membrană, materialul lor genetic este organizat în cromozomi, structuri care conțin ADN, ARN, proteine histonice și nonhistonice, lipide, ioni de magneziu și calciu etc. și care se colorează prin tehnica Feulgen, celulele de dimensiuni mai mari prezintă diviziune mitotică și conțin organite de tipul mitocondriilor, plastidelor fotosintetice etc. Celula de la mamifere, de pildă, este de circa 800 de ori mai mare decît cea a bacteriei *Escherichia coli*.

Pe baza cercetărilor comparative privind structura și funcțiile celulelor procariote și eucariote, în ultimii ani a fost elaborată, așa cum am arătat mai înainte, concepția conform căreia primele organisme de pe Pămînt au fost de tip procariotic și din ele, în cursul evoluției au rezultat celulele eucariote. În acest fel, *lumea vie poate fi clasificată în 5 mari regnuri : monere, protiste, ciuperci, animale* și *plante*.

În grupul Monerelor și Protistelor sînt incluse organisme similare plantelor, similare animalelor sau cu caracteristici comune, precum și altele care erau considerate mai înainte plante sau animale adevărate (algele mai evoluate și protozoarele).

Prin *Monere* se înțeleg acele organisme, în special unicelulare și numai în unele cazuri agregate în colonii sau mase multicelulare, care nu posedă un nucleu organizat și prevăzut cu membrană, care nu au cromozomi cu structură caracteristică plantelor și animalelor. Dintre Monere fac parte cele circa 2000 de specii de bacterii și cele peste 2500 de specii de alge albastre-verzi. Acestea sînt organisme de tip procariot. Toate celelalte 4 regnuri prezintă celule de tip eucariot.

Grupul *Protistelor* este mult mai variat, incluzînd algele eucariote, protozoarele și mixofitele. Unii cercetători consideră că din acest grup ar face parte și ciupercile. Protistele se caracterizează prin prezența nucleului,

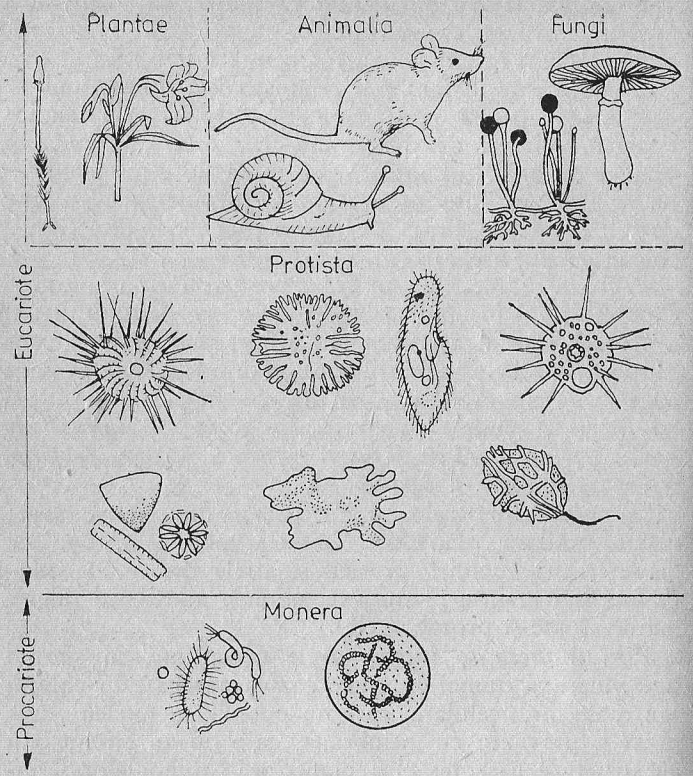

Fig. 14 — Clasificarea lumii vii în 5 regnuri (după L.Margulis).

prevăzut cu membrana care-l separă de citoplasmă, printr-un genom alcătuit din mai mulţi cromozomi bine individualizaţi, prin prezenţa diviziunii mitotice şi a unor organite celulare de tipul centriolilor, mitocondriilor, cloroplastelor, flagelilor etc. Protistele mai primitive sînt unicelulare, însă cele mai evoluate au devenit

multicelulare prezentînd ţesuturi. Din acest grup fac parte algele verzi, brune şi roşii — care se aseamănă cu plantele —, protozoarele — care se aseamănă cu animalele —, ciupercile cu cele aproape 120 000 de specii şi mixofitele care au caracteristici ce le apropie pe de o parte de ciuperci şi pe de alta, de protozoare.

Unii cercetători consideră *ciupercile* ca fiind un regn separat, deoarece acestea se deosebesc atît de protiste, cît şi de plante, mai ales prin modul lor de nutriţie heterotrof. În ce priveşte originea lor, ea nu este prea bine cunoscută, fiind considerate adesea ca organisme ce provin din plante prin pierderea cloroplastelor şi respectiv a fotosintezei.

Plantele şi *animalele* sînt organisme de tip eucariot. Animalele sînt în general, în contrast cu plantele, active deoarece sînt nevoite să se mişte în căutarea hranei pe care nu o pot produce ele singure. Datorită modului acesta de viaţă şi contactului cu medii foarte variate, animalele prezintă de regulă o sensibilitate dezvoltată faţă de mediul exterior. Mobilitatea şi sensitivitatea sînt deci primele caracteristici ale animalelor. De asemenea, ele sînt heterotrofe.

O altă caracteristică se referă la procesele de creştere, care de regulă sînt nelimitate la plante şi limitate la animale. Astfel, animalele îşi termină de obicei creşterea la maturitate, în timp ce plantele au tendinţa de a creşte toată viaţa. În ce priveşte celulele plantelor, ele au membrane celulozice relativ rigide şi sînt prevăzute cu clorofilă, astfel, că pot realiza fotosinteza, în timp ce celulele animale au membrane flexibile şi nu posedă clorofilă. Plantele sînt deci autotrofe. Desigur că la nivelul organismelor unicelulare există o seamă de forme intermediare, care posedă membrană rigidă, dar nu au clorofilă, sau posedă clorofilă şi au membrane flexibile. Adesea astfel de organisme sînt considerate plante de către unii şi animale de către alţii.

VIRUSURILE ŞI EVOLUŢIA

O problemă încă nelămurită este originea şi rolul virusurilor în evoluţie. În linii mari, s-au conturat două curente privind originea virusurilor, şi anume unul care susţine că ele ar fi forme de viaţă primitive, extrem de simple, care n-au căpătat încă o structură celulară, iar altul care pretinde că ar fi organisme care datorită modului de viaţă intracelular au pierdut organizarea celulară, păstrîndu-şi numai materialul genetic şi învelişul proteic (capsida) (fig. 15). Pentru reproducere ele folosesc de regulă aparatul enzimatic al celulei gazdă.

Extrem de interesant este faptul că celulele procariote şi eucariote pot fi infectate de un număr mare de virusuri. De pildă, bacteria *Escherichia coli* poate fi atacată de 50 de bacteriofagi diferiţi, iar în cazul speciei umane sînt cunoscute aproape 500 de boli virotice.

Recent a fost elaborată teoria oncogenelor care susţine că diferitele forme de cancer sînt rezultatul interacţiunii dintre materialul genetic celular şi genele unor virusuri care sînt componenţi mai mult sau mai puţin normali ai celulelor animalelor vertebrate. De pildă, virusuri de tip ARN latente au fost izolate de la pisici, şobolani, hamsteri, cobai, bovine, găini etc. În timp ce în gazda lor obişnuită aceste virusuri rămîn în stare latentă, cînd infectează o altă specie devin virulente. De pildă, virusul SV40 este inofensiv în gazda sa obişnuită, maimuţa *Macaca mulatta*, dar induce formarea de tumori maligne prin injectarea sa în puii de hamster.

O ipoteză extrem de seducătoare susţine că încă în perioada existenţei exclusive a celulelor de tip procariot, virusurile au avut un rol esenţial în transferul de gene de la o specie la alta şi în felul acesta au determinat variabilitatea şi respectiv adaptarea lor la mediu. După apariţia celulelor mai evoluate de tip eucariot, virusurile continuă să influenţeze evoluţia prin aceea că transferă gene de la o specie la alta, chiar extrem de îndepărtate filogenetic. Conform cu această ipoteză rolul virusurilor în evoluţie constă în transferul de gene peste barierele de specie, chiar de la procariote la eucariote şi viceversa. În conformitate cu această teorie, selecţia naturală ar acţiona asupra celulelor care au asociate gene virale, iar ritmul evoluţiei ar depinde de numărul de virusuri asociate şi de viteza cu care se realizează transferul de gene de la o populaţie la alta, de la o specie la alta.

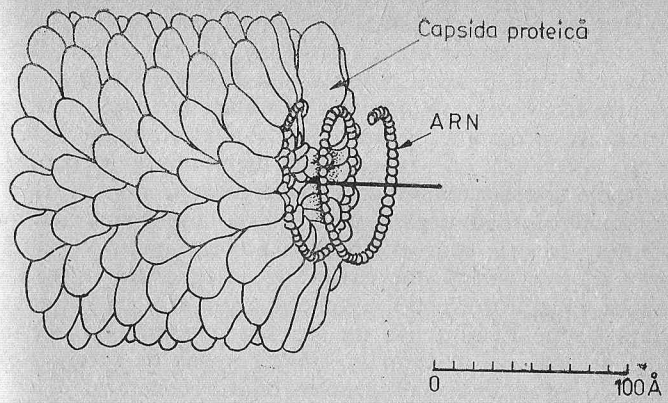

Fig. 15 — Structura virusului mozaicului tutunului alcătuit dintr-o macromoleculă de acid nucleic (ARN) şi un înveliş proteic denumit capsidă.

GENETICA POPULAŢIILOR ŞI EVOLUŢIA

În concepţia actuală, viaţa a luat naştere în momentul constituirii unui *program genetic*, iar organismele nu sînt altceva decît realizarea programelor prescrise de ereditate în anumite condiţii de mediu. Existenţa

programului genetic este legată de acizii nucleici, care au posibilităţi intrinsece de codificare şi înregistrare biochimică a informaţiei genetice. Ca urmare, de la o generaţie la alta nu se transmit caractere şi însuşiri, ci se transmite programul genetic înscris în cromozomii fiecărei specii şi prin care sînt determinate structura, funcţiile şi arhitectura viitorului organism.

Faptul că toate organismele vii, de la cele mai simple virusuri la cele mai evoluate mamifere inclusiv omul, prezintă un acelaşi mecanism de înregistrare a informaţiei cu ajutorul codului genetic arată clar că întreaga viaţă de pe Pămînt are un strămoş comun. Din acesta s-au diversificat în timp un număr imens de specii, fiecare cu programul său genetic relativ constant.

Cu toate că fiecare specie are programul său genetic bine determinat, totuşi odată cu apariţia sexualităţii, au apărut şi o seamă de mecanisme prin care are loc recombinarea programelor, cum sînt: separarea materialului genetic în mai mulţi cromozomi, segregarea independentă a cromozomilor perechi, schimbul reciproc de gene dintre cromozomii perechi, combinarea probabilistică a gameţilor în procesul fecundării etc. Ca urmare, fiecare individ din cadrul unei populaţii reprezintă o entitate unică şi nerepetabilă, fiind rezultatul unui proces de recombinare genetică, adică al unui fenomen de recombinare a programelor genetice. Aceasta înseamnă existenţa unei imense diversităţi între indivizi, adică o variabilitate genotipică nelimitată. Într-adevăr, unul dintre factorii de bază ai evoluţiei este *variabilitatea.*

Teoria evoluţionistă, ale cărei baze au fost puse încă în a doua jumătate a secolului al XIX-lea de către Charles Darwin, consideră în esenţă că toate organismele descind dintr-unul sau din cîţiva strămoşi comuni şi că speciile au rezultat unele din altele prin selecţie naturală, în condiţiile mereu schimbătoare ale mediului.

Teoria evoluţionistă a fost dezvoltată şi completată în cursul secolului actual, mai ales pe baza descoperirilor din domeniul geneticii.

În concepţia actuală, evoluţia este rezultanta confruntării populaţiilor cu mediul. În cazul că populaţiile se adaptează mediului în schimbare are loc o modificare a frecvenţei genelor din fondul lor genetic şi ca urmare se produce evoluţia (fig. 16). Dimpotrivă, dacă populaţiile nu răspund la aceste modificări ale mediului şi fondul lor genetic rămîne neschimbat, ele dispar sau devin fosile vii, deoarece evoluţia nu se produce.

Un rol deosebit de important în elaborarea concepţiei actuale despre evoluţie l-a avut *genetica populaţiilor*, acea ramură a geneticii care studiază legile după care se modifică frecvenţa genelor într-o populaţie, fenomen ce determină evoluţia. În acest scop, genetica populaţiilor utilizează mai ales modele matematice, căutînd să stabilească parametrii cît mai exacţi în care se produce evoluţia populaţiilor mendeliene (genetice).

Să vedem mai întîi ce se înţelege printr-o *populaţie mendeliană* sau *genetică.* O astfel de populaţie este formată din totalitatea indivizilor ce aparţin unei anumite specii, între care se poate realiza încrucişarea sexuată nelimitată, adică *panmixia*, care au ascendenţi şi descendenţi comuni. Deci condiţia de bază a unei asemenea populaţii este reproducerea sexuată prin care se realizează schimbul de informaţie genetică între indivizi, circulaţia sa în cadrul populaţiei. În ce priveşte specia, ea poate fi definită ca un ansamblu de populaţii, rase geografice şi subspecii care au acelaşi fond genetic şi între care poate avea loc un schimb reciproc nelimitat de gene, dar care sînt izolate de alte specii prin mecanisme care împiedică încrucişarea sau reproducerea hibrizilor, în cazul cînd ei sînt produşi.

Fig. 16 — Influența mediului asupra fenotipului la planta *Sagittaria sagitifolia* în condiții submerse (stînga) și aeriene (dreapta).

Primul moment în procesul evoluției îl constituie diferențierea genotipică * în interiorul populației, adică variabilitatea care apare prin recombinarea genetică și mutații. Fenomenele de recombinare genetică de care am amintit se realizează în special în cadrul procesului sexual, iar mutațiile reprezintă capacitatea organismelor de a recepționa semnale din mediul înconjurător și de a reacționa la acestea prin modificări ereditare. Acestea constituie „materia primă" pe baza căreia se realizează evoluția.

Între populațiile aceleiași specii se produce un schimb reciproc de gene prin intermediul polenului sau al semințelor purtate de vînt, de apă, de animale etc., sau — în cazul speciilor animale — prin intermediul unor indivizi care migrează dintr-o populație în alta. În cazul unei anumite specii se realizează circulația genelor între populațiile, rasele geografice și subspeciile care o alcătuiesc.

La plantele cultivate și animalele domestice nu se realizează panmixia, deoarece are loc o selecție a anumitor fenotipuri și respectiv genotipuri, care sînt reproduse de om prioritar în conformitate cu interesele sale. De aceea la aceste specii nu există decît *populații artificiale.* În cadrul populațiilor umane nu are loc decît o panmixie limitată, datorită diferitelor bariere sociale, culturale, estetice, religioase etc.

Bazele geneticii populațiilor au fost puse încă din 1908 de către matematicianul G. Hardy în Anglia și de medicul W. Weinberg în Germania care au formulat o lege care le poartă numele. În conformitate cu această lege, *într-o populație panmictică și cu un efectiv numeros, frecvența genelor se menține constantă atît timp cît nu intervin diferiți factori care să strice acest echi-*

* Totalitatea genelor ce determină caracterele morfofiziologice și biochimice ale unui organism dat alcătuiesc genotipul său.

libru. Evident că în natură nu se întîlnesc populaţii în echilibru perfect, legea Hardy-Weinberg referindu-se la un caz teoretic, ideal. Permanent în natură intervin o serie de factori aleatorii care modifică această stare de echilibru şi fac populaţiile să evolueze.

Unul dintre factorii cei mai importanţi care modifică frecvenţa genelor într-o populaţie este *mutaţia* (fig. 17). Diferitele gene ale unui organism se modifică permanent prin mutaţie însă cu o frecvenţă diferită, care în medie este de ordinul 1/100 000 pînă la 1/1 000 000. Aceasta este o frecvenţă destul de mică, însă dacă ţinem seama de numărul mare de gene ale unui organism, numărul de indivizi care prezintă mutaţii în fiecare generaţie este destul de mare. De pildă, la musculiţa de

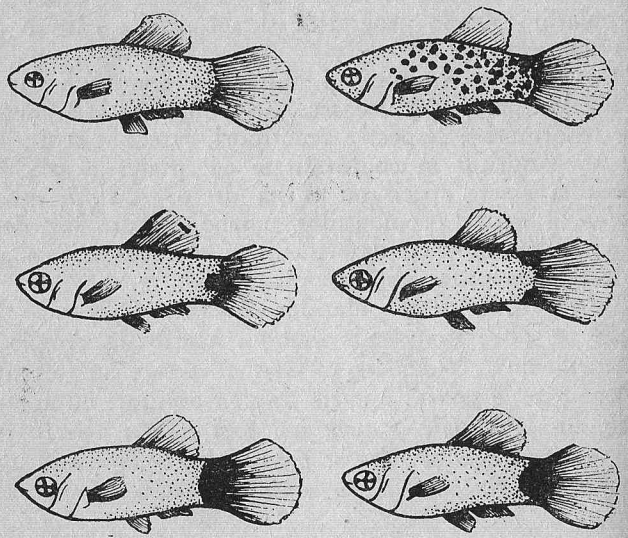

Fig. 17 — Cîteva mutante ale peştelui *Platypoecillus maculatus*.

oţet (*Drosophila melanogaster*) 2—3% dintre indivizii fiecărei generaţii sînt afectaţi de o mutaţie oarecare. În majoritate mutaţiile sînt recesive, de aceea ele nu se manifestă decît în stare homozigotă (adică atunci cînd gena respectivă se găseşte pe ambii cromozomi pereche), în schimb însă se acumulează în genofondul speciei respective. În cursul zecilor sau sutelor de mii de generaţii, s-au acumulat un număr mare de mutaţii care se manifestă şi fenotipic numai cînd ajung în stare homozigotă.

Un exemplu interesant de determinism al frecvenţei genelor îl constituie grupele de sînge uman în sistemul ABO. În determinismul genetic al acestor grupe de sînge intervin două gene diferite (L^A şi L^B) codominante (care deci nu domină nici una asupra celeilalte) şi care determină tipurile A şi B, iar împreună determină tipul AB. Mai există însă şi o a treia genă recesivă (l), care în stare homozigotă determină tipul 0, conform tabelului. Evident că apariţia acestor gene s-a făcut prin procese mutaţionale succesive în timp.

Grupele sanguine	Genotipul
A	$L^A L^A$ sau $L^A l$
B	$L^B L^B$ sau $L^B l$
AB	$L^A L^B$
0	l l

În majoritatea populaţiilor umane cele 3 gene care determină aceste tipuri sanguine se menţin cu o frecvenţă relativ constantă datorită faptului că mariajele se realizează probabilistic, între indivizi aparţinînd celor 3 grupe sanguine şi că prezenţa diferitelor gene

nu afectează fecunditatea și supraviețuirea copiilor. La unele triburi de indieni americani, la aborigenii australieni și la populația bască din Franța și Spania, gena B lipsește complet, astfel că la aceste populații nu există decît două grupe sanguine, A și 0. Evident că studiile privind grupele sanguine și frecvența lor într-o populație prezintă un mare interes atît medical, cît și pentru caracterizarea genetică și antropologică a populației respective.

Ținînd seama de legea Hardy-Weinberg, se poate relativ ușor determina eficiența selecției asupra indivizilor care prezintă fenotip dominant sau recesiv. În cazul genelor mutante dominante, care sînt relativ rare, ele pot fi ușor eliminate în cazul că determină anumite defecte ale indivizilor respectivi. Chiar și într-o singură generație indivizii homozigoți (AA) sau heterozigoți (Aa) care prezintă mutația dominantă pot fi eliminați.

În cazul genelor mutante recesive, care reprezintă marea majoritate, ele nu pot fi eliminate decît atunci cînd se manifestă fenotipic la indivizii homozigoți (aa), în timp ce indivizii heterozigoți (Aa), la care aceste mutante nu se manifestă, conservă și transmit din generație în generație gena respectivă. Iată de ce în fondul genetic al unei populații se află permanent un număr foarte mare de gene recesive care se transmit din generație în generație fără a fi exprimate, cu toate că ele în bună măsură sînt dăunătoare organismelor. Aceste gene mutante recesive nu se manifestă decît în cazuri destul de rare, cînd ajung în stare homozigotă. Cînd însă în cadrul unei populații prin fecundare încrucișată se manifestă permanent un anumit grad de heterozigoție, mutațiile recesive nu apar. Numai în cazul autofecundării la plante sau fecundării între indivizi înrudiți la animale, genele mutante recesive ajung în stare homozigotă și se manifestă. Și în cazul speciei umane există în genofondul său numeroase gene recesive

dăunătoare, fapt pentru care căsătoriile între rude sînt interzise prin lege, deoarece ele au efect dăunător asupra urmașilor, la care se manifestă adesea genele mutante recesive dăunătoare.

Este foarte interesant de semnalat că chiar mutațiile letale recesive ce determină în stare homozigotă moartea indivizilor respectivi se mențin în cadrul populației fiind transmise de la o generație la alta prin intermediul indivizilor heterozigoți. Uneori s-a constatat că mutațiile letale recesive își mențin frecvența relativ ridicată într-o populație, datorită faptului că heterozigoții, care prezintă deci această genă în stare recesivă, prezintă anumite avantaje selective. Astfel, la om este cunoscută o maladie gravă a sîngelui denumită drepanocitoză, provocată de prezența în sînge a unei hemoglobine anormale notată cu HbS, spre deosebire de cea normală, notată cu HbA (fig. 18). Apariția acestei hemoglobine anormale se datorează prezenței unei gene recesive letale, notate cu h^s, care a fost produsă prin mutația genei normale h^a. Indivizii homozigoți h^sh^s prezintă în sînge numai hemoglobină anormală, fapt care le determină moartea. În schimb, s-a constatat că în diferite țări mediteraneene, în care malaria este foarte răspîndită, frecvența indivizilor heterozigoți h^sh^a, care prezintă concomitet atît hemoglobină normală, cît și anormală, este relativ mare și se menține constantă. Aceasta din cauză că prezența hemoglobinei anormale în proporție de circa 40% mărește rezistența indivizilor respectivi la parazitul care provoacă malaria (*Plasmodium falciparum*).

Adesea se consideră în mod eronat că mutațiile dezavantajoase sînt eliminate rapid dintr-o populație. Studiile de genetica populațiilor au arătat că, într-adevăr, selecția elimină relativ repede la început mutațiile dezavantajoase, însă pe măsură ce frecvența acestor mu-

tante diminuează, selecția practic își încetează acțiunea. La un moment dat se creează o stare de echilibru între mutație și selecție, astfel că mutantele dăunătoare sînt păstrate cu o anumită frecvență în cadrul populației.

La om s-a constatat statistic că diferite mutante ce provoacă maladii grave sau sînt chiar letale se păstrează în cadrul populației cu o anumită frecvență, relativ redusă. De pildă, gena mutantă recesivă care determină apariția hemofiliei se menține cu o frecvență de 2—3,2 la 100 000 gameți, iar gena mutantă ce determină formarea retinoblastomului are o frecvență de 0,4—2,3 la 100 000 gameți.

Datorită fenomenelor descrise, într-o populație care aparent este normală și sănătoasă, există numeroase gene mutante defavorabile sau chiar letale, dar care

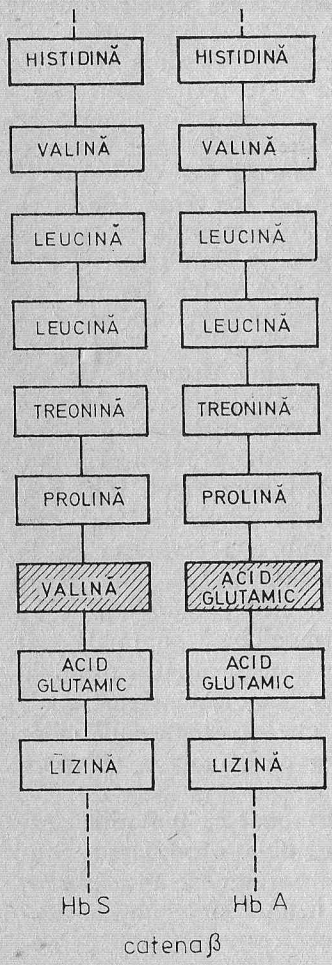

Fig. 18 — Deosebirea dintre hemoglobina normală (HbA) și cea care determină maladia sîngelui denumită drepanocitoză (HbS) constă în înlocuirea unui singur aminoacid din cei circa 600 ai moleculei respective. Este vorba de acidul glutamic care este înlocuit de aminoacidul valina în catena β.

fiind recesive nu se manifestă decît relativ rar. În prezent există metode pentru a determina frecvența mutațiilor recesive dăunătoare sau chiar letale într-o populație, metode care în esență constau în autofecundare la plante sau fecundare înrudită la animale, prin care se produce consanguinizarea și ca urmare homozigotarea genelor recesive respective, care în felul acesta se manifestă fenotipic. Se pot pune astfel în evidență defectele ereditare ale unei populații. În general, se consideră că speciile actuale sînt purtătoare în stare recesivă a unui număr imens de mutații, care au avut posibilitatea să apară în mod repetat în cursul evoluției. Ca urmare, fondul genetic al speciilor actuale este de regulă foarte bogat, încît pentru evoluție nu trebuie neapărat să se conteze pe noi mutații, deoarece se poate considera că majoritatea mutațiilor posibile au apărut odată sau chiar de cîteva ori în cursul istoriei speciei respective.

Prezența unui număr foarte mare de mutații recesive plasate pe diferiți cromozomi stă la baza variabilității genotipice a indivizilor unei populații. Prin fenomene de recombinare genetică, în cadrul unei populații are loc o reorganizare permanentă de natură probabilistică a fondului genetic, astfel că fiecare individ apare ca o entitate unică și nerepetabilă din punct de vedere genetic. S-a calculat, de pildă, la porumb (*Zea mays*), care are $2n = 20$ de cromozomi, că dacă pe fiecare pereche de cromozomi ar fi numai o singură pereche de gene alele numărul de combinații care se realizează prin disjuncția independentă a cromozomilor de origine maternă și paternă este de $4^{10} = 1\,048\,576$ (fig. 19). Iată deci cum prin combinarea probabilistică a genelor din fondul genetic al unei specii se formează genotipuri și fenotipuri extrem de variate care alcătuiesc ceea ce se cheamă variabilitate intraspecifică. Dacă pe fiecare cromozom la porumb ar fi numai cîte 3 gene, numărul teoretic de combinații este imens, încît ar fi necesară o suprafață

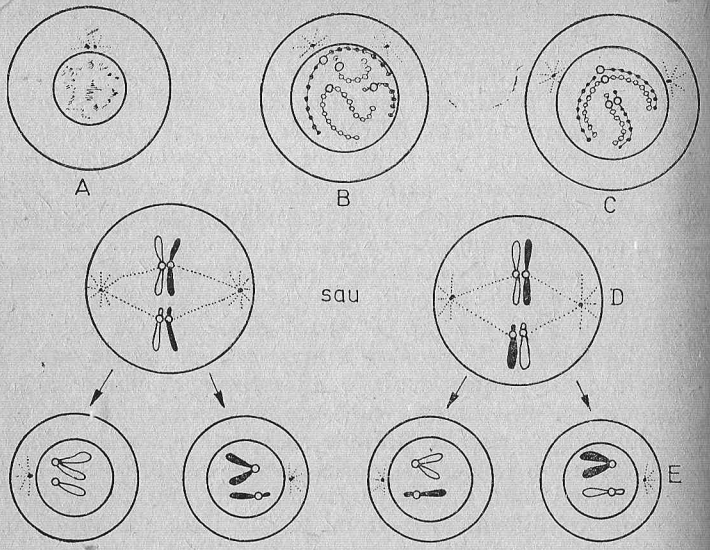

Fig. 19 — Prin disjuncția independentă a două perechi de cromozomi în cursul meiozei (A, B, C și D) rezultă celule sexuale la care apare fenomenul recombinării genetice (E). La organismele care au mai multe perechi de cromozomi numărul de combinații rezultat este mult mai mare.

de 2000 de ori mai mare decît cea a Pămîntului pentru a le putea cultiva.

Fenomenele de recombinare genetică de care am amintit se realizează în special în cadrul procesului sexual, iar mutațiile reprezintă în ultimă instanță „materia primă" pe baza căreia se realizează adaptarea la mediu și respectiv evoluția viețuitoarelor.

ADAPTAREA LA MEDIU A VIEȚUITOARELOR

Adaptarea organismelor la mediu este un fenomen de natură genetică, prin care se schimbă frecvența genelor

într-o populație și sînt selectate genotipurile și respectiv fenotipurile corespunzătoare schimbărilor de mediu. Rezultatul este evoluția populației respective. Un exemplu binecunoscut îl constituie melanismul industrial la insecte, fenomen care exprimă schimbarea frecvenței genelor implicate în determinismul genetic al pigmenților de tipul melaninei, gene apărute în cursul evoluției prin mutație. În Anglia, de pildă, mutantele melanice de culoare închisă ale insectei *Biston betularia* au fost selecționate în mod natural, deoarece ele prezentau o mai mare valoare adaptativă decît formele deschise la culoare, în condițiile în care pămîntul, arborii, casele etc. au căpătat o culoare mai închisă datorită dezvoltării industriei. În prezent sînt cunoscute numeroase exemple de adaptare a populațiilor la noile condiții de mediu prin selecția, de pildă, a mutantelor bacteriene rezistente la antibiotice, a mutantelor insectelor rezistente la insecticide ș.a.m.d.

Un alt factor care modifică frecvența genelor într-o populație și contribuie la evoluție este *valoarea selectivă diferită a genelor*. Aceasta determină ca unele genotipuri să aibă o mai mare capacitate adaptativă, comparativ cu altele. Dacă, de pildă, prin mutație gena *A* se transformă în *a* și aceasta are o valoare selectivă de numai 90% comparativ cu gena *A* (care are 100%), aceasta înseamnă că în conformitate cu legea Hardy-Weinberg în descendența de tip *AA*, *Aa* și *aa*, indivizii cu genotipul *aa* vor supraviețui în fiecare generație numai în proporție de 90%. Rezultatul acestei capacități adaptative diferite este o reducere a frecvenței genei *a* și o creștere a frecvenței genei *A* în fiecare generație.

Studierea unui mare număr de mutații a arătat că ele se pot compensa reciproc, se pot intensifica sau diminua ca acțiune. Aceasta înseamnă că valorile adaptative a două mutante care afectează același organism nu sînt independente. Iată de ce valoarea adaptativă se referă

mai ales la întreg genotipul, fiind mai corect vorba de *combinații de gene avantajoase sau dezavantajoase.*

Prin translocarea unui segment cromozomal pe care se găsesc cîteva gene este posibilă plasarea alăturată pe cromozom a unor gene care acționează armonios împreună și măresc valoarea adaptativă a genotipului respectiv. Aceste gene care, fiind plasate alăturat pe cromozom, se transmit de obicei în bloc la descendenți și determină o mărire a valorii lor adaptative, au primit denumirea de *supergene.*

Un alt factor care modifică frecvența genelor în populațiile mici este *deriva genetică întîmplătoare.* S-a constatat că în populațiile mici, datorită jocului întîmplării, unele gene mutante se pot pierde complet. De pildă, la porumb (*Zea mays*), unde există $2n = 20$ cromozomi, dacă se admite așa cum am arătat că pe fiecare pereche de cromozomi există o singură pereche de gene (tipul sălbatic și alela mutantă), numărul de combinații care se realizează în F_2 datorită recombinării genetice este $4^{10} = 1\,048\,576$. Numărul de gameți masculi fiind foarte mare, este posibil ca în cazul unei populații reduse ca număr să se realizeze totuși toate aceste combinații. Dimpotrivă, numărul de gameți femeli este foarte redus, astfel că în cazul unui număr mic de plante, bineînțeles că nu se realizează decît o mică parte din combinațiile posibile. În urma fecundării devine posibilă pierderea întîmplătoare a unor gene și fixarea altora. Rezultatul este diminuarea genofondului populației respective.

În populațiile mari, prin interacțiunea dintre valoarea selectivă a genelor și mutații, se realizează o frecvență de echilibru pentru fiecare genă. Apare astfel *homoeostazia genetică*, fenomen care poate fi definit drept tendința sistemelor genetice de a reacționa la factorii externi care le influențează, astfel că sistemul se menține la valorile sale normale. În cazul populațiilor

mici, homeostazia nu se realizează, astfel că o mutație oarecare poate fi eliminată sau fixată pe bază de hazard. S-a calculat, de pildă, că o mutație recesivă cu o frecvență de 1 la 100 000 va fi eliminată în următoarele proporții în funcție de mărimea populațiilor :

15% la populațiile de 10 000 indivizi ;
87% la populațiile de 1 000 indivizi ;
99% la populațiile de 100 indivizi.

În sfîrșit, un ultim factor ce afectează frecvența genelor este *migrația*, care constă în pierderea de gene prin emigrare și aportul de gene prin *imigrare.* Desigur că emigrația unor indivizi cu un anumit genotip dintr-o populație are efecte similare cu selecția, în sensul că din populația respectivă sînt eliminate anumite gene.

Iată un exemplu interesant privind fenomenul migrației în cadrul populației umane : în locusul Rh în care se găsesc gene ce determină un anumit tip sangvin există o mutație (R°) care la americanii albi are o frecvență de 0,028, în timp ce la americanii negri are o frecvență mult mai mare, fiind de 0,446. Între cele două populații au avut loc în mod evident schimburi reciproce de gene care au afectat mai ales populația neagră, mai puțin numeroasă și separată de continentul african de circa 300 de ani. Frecvența mutației respective (R°) la populația neagră din Africa este de 0,630. Iată deci că în timp de 300 de ani, frecvența acestei gene s-a redus la 0,446. Se poate conchide că a avut loc un transfer de gene în special de la populația albă (mai numeroasă) la cea neagră (mai redusă ca număr), astfel că circa 70% din genele negrilor americani sînt de origine africană, iar 30% sînt transferate de la populația albă.

În concluzie, trebuie subliniat că mutațiile sînt fără îndoială principalul material brut cu care „lucrează" evoluția. Cu ajutorul lor, toate formele de viață sînt

constant schimbate și adaptate la condițiile mediului înconjurător.

În ciuda faptului că mutațiile fac posibilă evoluția, marea lor majoritate sînt nocive pentru organismele la care apar. De pildă la om, albinismul și hemofilia sînt provocate de gene dăunătoare. De fapt, toate mutațiile care cauzează bolile ereditare umane sînt dăunătoare.

De ce majoritatea mutațiilor sînt dăunătoare și cum se explică faptul că ele au totuși un rol atît de important în evoluție ?

Speciile actuale existente pe Terra sînt rezultatul unui lung proces de evoluție, ele fiind alcătuite din organisme specializate și selectate. Marea lor majoritate au pierit în decursul timpului în lupta pentru existență. Nici speciile existente în prezent nu sînt perfecte și de aceea ele se schimbă și se desăvîrșesc, adică evoluează. Șansele ca o mutație să fie utilă pentru evoluție sînt foarte mici. Prin selecție însă, puținele mutații utile sînt păstrate, frecvența lor se mărește și populația respectivă evoluează.

Desigur că o specie foarte bine adaptată ar putea să supraviețuiască neschimbată, dacă ar avea șansa să trăiască într-un mediu care nu se modifică niciodată. Din cauză că acest fenomen nu există în natură, organismele se readaptează la mediul schimbat. Aceasta înseamnă că, pentru a supraviețui, o specie trebuie să manifeste un echilibru între fondul său genetic, care include numeroase gene mutante, și condițiile variabile ale mediului ambiant.

Formarea de specii noi, adică speciația, se poate realiza prin două procese distincte : *cladogeneza* și *anageneza.* Cladogeneza este procesul prin care dintr-o specie inițială se formează două sau mai multe specii diferite, fiind deci un proces de diversificare evolutivă. Anageneza înseamnă transformarea unei specii în decursul timpului, adică de înlocuire a unei specii cu alta mai bine adaptată noilor condiții.

SPECIAȚIA ȘI IZOLAREA GENETICĂ

În procesul de speciație, un moment foarte important îl constituie *izolarea genetică a populațiilor, raselor geografice și subspeciilor,* astfel că ele devin specii între care nu se mai realizează schimb de gene. Înfăptuirea acestei izolări implică două condiții de bază : în primul rînd, împiedicarea încrucișării între indivizii celor două populații, fapt care se poate datora unor cauze de natură genetică, ecologică, fiziologică etc. și în al doilea rînd, împiedicarea reproducerii hibrizilor în cazul în care ei au fost totuși produși.

De pildă, în cazul speciilor de plante *Gilia splendens* și *G. australis* acționează ambele tipuri de mecanisme pentru a realiza izolarea genetică a lor. Astfel, în cazul polenizării speciei *G. splendens* cu polen de la cealaltă specie, nu are loc fecundarea din cauză că tuburile polinice cresc foarte încet. În cazul încrucișării inverse, fecundarea se realizează normal, însă embrionul hibrid nu se poate dezvolta din cauza degenerării endospermului.

În procesul de speciație, la baza apariției acestor mecansime de izolare genetică între specii a stat *o izolare geografică sau spațială prelungită* a populațiilor respective în curs de evoluție. În prezent există numeroase argumente științifice care atestă că speciația este de natură *alopatrică,* ceea ce înseamnă că ea s-a realizat pe baza acestei izolări a populațiilor sau raselor geografice.

Un exemplu foarte interesant privind rolul raselor geografice în procesul de speciație a fost studiat la pescăruș, o pasăre binecunoscută în regiunile de coastă

ale Americii, Europei și Asiei. Pescărușul, răspîndit în lungul coastelor maritime amintite, formează un inel în jurul polului. De-a lungul acestui inel se întîlnesc mai multe rase geografice, între care au loc schimburi de gene.

Pe coasta franceză și cea scandinavă există însă două specii distincte, *Larus fuscus* și *L. argentatus*, care nu sînt capabile de încrucișare și deci de schimb de gene. Forma primitivă din care au derivat aceste specii este originară din Asia, de unde s-a răspîndit spre est către America și spre vest către Europa. Aici a avut loc întîlnirea dintre rasele geografice diferențiate tot mai mult în decursul timpului, care alcătuiau cele două capete ale inelului. Diferențierea accentuată a celor două rase geografice a dus la constituirea a două specii distincte, care, deși sînt foarte înrudite și chiar coabitează, nu se mai încrucișează, deci nu mai pot realiza schimbul de gene, fiind deci specii adevărate.

În general, *speciile sînt constituite din subspecii, rase geografice și populații*, deși adesea aceste subunități nu sînt perfect delimitate, între ele existînd legături dinamice. După *E. Mayr* (1974), populațiile unei specii se pot găsi în mai multe situații, după cum urmează :

1. serii de populații tangente aparținînd aceleiași specii între care există modificări gradate ;

2. populații separate de specia căreia îi aparțin și care alcătuiesc izolate geografice ;

3. centuri hibride între populații învecinate în care se manifestă o variabilitate crescîndă, înconjurate de grupe de populații sau subspecii stabile și foarte uniforme.

În cazul primului grup, de *populații tangente*, se poate remarca faptul că ele sînt rezultatul acțiunii unor forțe opuse, și anume : selecția care caută să realizeze adaptarea populației la mediul local și fluxul de gene care are tendința să uniformizeze populațiile unei

specii. De pildă, cercetările lui B. Peterson (1947), efectuate asupra a 16 specii de fluturi din țările scandinave, au arătat că peste 50% din caracterele lor prezintă variații continue, ceea ce arată că ele sînt constituite din populații tangente între care se realizează schimb de gene.

Izolatele geografice sînt, de fapt, populații izolate care nu pot schimba gene cu alte populații ale speciei (fig. 20). Ca urmare, ele sînt genetic independente de alte populații ale speciei respective. Desigur că izolarea are un caracter relativ, căci chiar în cazul populațiilor izolate pe insule oceanice au totuși loc din cînd în cînd anumite schimburi de gene. În general, izolatele geografice se găsesc la periferia arealului de răspîndire al speciei respective. Din punctul de vedere al perspectivelor izolatelor, ele pot deveni specii distincte, pot dispărea sau se pot reintegra în cadrul speciei.

În ce privește *centurile hibride între populații* cu fenotipuri distincte, existența lor se datorează panmixiei în zona de contact a două populații izolate anterior și care au evoluat divergent. Fenomenul a fost denumit *hibridare alopatrică.*

Un exemplu foarte interesant în acest sens îl constituie cele două forme ale corbului : de culoare total neagră (*Corvus corone*), care are aria de răspîndire în vestul Europei, și cel negru și cu capul gri (*C. cornix*), răspîndit în estul Europei și regiunea mediteraneană.

În centura de hibridare — care corespunde unei zone relativ restrînse ce începe din Scoția și ajunge pînă la Marea Mediterană, în Italia — se întîlnesc nenumărate tipuri hibride, asemănătoare mai mult sau mai puțin cu unul din genitori și avînd doar cîteva caractere de la celălalt, precum și forme complet intermediare. Formele extreme ale corbului pot fi astfel considerate „species in statu nascendi" (specii în stare născîndă), între care nu s-au stabilit încă bariere ge-

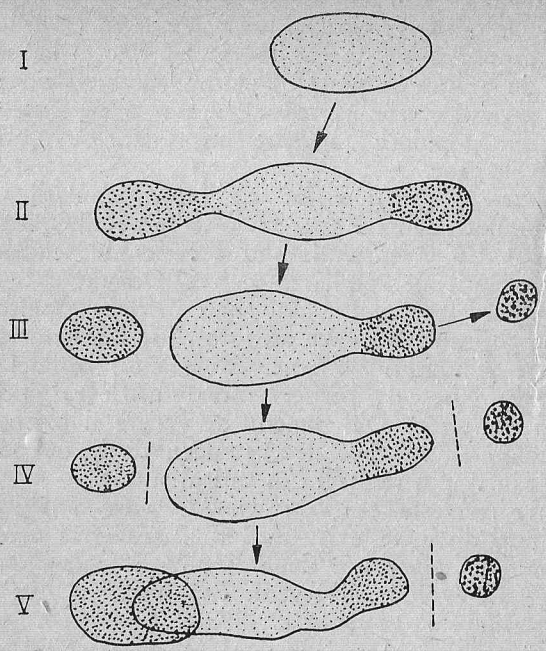

Fig. 20 — Cîteva etape succesive ale procesului de speciație, în care, pornindu-se de la o singură populație (I), se realizează schimbarea frecvenței genelor în acele părți ale populației care trăiesc în medii diferite (II), încît unele dintre acestea, prin izolare și apariția unor bariere genetice, devin specii noi (III și IV).
Chiar dacă aceste specii conviețuiesc (V) ele își păstrează individualitatea, din cauza barierelor genetice dintre ele (după G. L. Stebbins, 1971).

netice capabile să împiedice hibridarea sau să determine sterilitatea hibrizilor.

Adesea hibridarea alopatrică s-a manifestat în special datorită schimbării condițiilor de mediu, prin care izolate geografice și ecologice încep o expansiune a

arealului lor. Fenomenul s-a manifestat puternic mai ales în zonele temperate, ca urmare a glaciațiilor, cînd izolatele care au rezistat au reînceput să se extindă și ca urmare să realizeze centuri de hibridare cu alte populații cu care au venit în contact.

Un exemplu interesant de hibridare alopatrică a fost studiat la două populații ale unei moluște marine (*Thais lapillus*) care prezintă un număr diferit de cromozomi, una cu $2n=26$ și alta cu $2n=36$. În timp ce primul tip este răspîndit în apele agitate, al doilea este răspîndit în golfurile cu ape liniștite din Bretagne (Franța). Deoarece formele respective se încrucișează genetic, se găsesc colonii numeroase cu o variație a numărului de cromozomi de la 27 pînă la 35 cromozomi, variație care se realizează prin restructurări de tip robertsonian (fusiune/fisiune) a cromozomilor. Apariția celor două populații cromozomale și ecologice este explicată prin izolarea lor, fără ca aceasta să fie urmată de apariția unei bariere genetice reproductive.

În centurile hibride, datorită unei selecții naturale continue, apariția formelor hibride se explică prin reintroducerea permanentă a genotipurilor parentale. Numai în cazul izolării eventuale a centurilor hibride de curentul de gene de la populațiile parentale este posibilă evoluția lor independentă.

Pe cale experimentală s-a dovedit că odată începută izolarea genetică a populațiilor, ea continuă și se accentuează, mai ales atunci cînd hibrizii prezintă un dezavantaj cît de mic față de genitori.

Speciile de insecte *Drosophila pseudoobscura* și *D. persimilis* se încrucișează rar în natură, deși trăiesc în același mediu. În laborator însă se încrucișează cu ușurință și pe scară mare. Experimental s-a dovedit că dacă hibrizii — care se recunosc ușor — sînt distruși în fiecare generație, frecvența cu care se încrucișează cele două specii se reduce rapid în cîteva generații. Ast-

fel, dacă în prima generaţie se obţin 49% hibrizi, prin eliminarea lor în generaţia următoare apar numai 18% hibrizi, astfel că în generaţia a cincea se obţin numai 5% hibrizi. Selecţia practicată a dus la eliminarea indivizilor care prezintă gene ce favorizează încrucişarea şi la conservarea celor care prezintă gene ce determină izolarea. Iată deci că odată început acest proces, există numeroase şanse ca el să continue să acţioneze şi să devină tot mai eficient.

În sfîrşit, trebuie subliniat că în cadrul unei specii există diferenţe considerabile între populaţiile centrale şi periferice. Astfel, s-a remarcat de mult timp că populaţiile periferice prezintă o izolare geografică relativă, o densitate mai redusă pe unitatea de suprafaţă şi o variabilitate individuală redusă. Aceasta din cauză că populaţiile cele mai izolate provin dintr-un număr foarte redus de ascendenţi, care nu conţin decît o parte din totalitatea genelor speciei. Reducerea fluxului de gene prin apariţia unor bariere şi presiunea selecţiei naturale determină în continuare o reducere a variabilităţii genetice în populaţiile periferice.

În general, se poate sublinia faptul că practic toate speciile sînt constituite din numeroase populaţii locale, fiecare adaptată la propriul său mediu ambiant. Datorită fluxului de gene care se realizează prin hibridare şi migraţia unor indivizi, se menţine contactul între ele. Totuşi trebuie evidenţiat faptul că fiecare populaţie are o structură genetică particulară, în care frecvenţa unor gene este modificată comparativ cu cea a altor populaţii ale aceleiaşi specii.

În ce priveşte numărul de subspecii, rase geografice şi populaţii care intră în alcătuirea unei specii, el este extrem de variabil de la un grup sistematic la altul. De pildă, la un total de 8 600 specii de păsări, numărul de subspecii este 28 500, revenind în medie 3,3 subspecii per specie. La rîndunele (*Hirundinidae*) există

2,6 subspecii per specie, iar la ciocîrlii (*Alaudidae*), 5,1 subspecii per specie, existînd deci o variaţie destul de importantă de la un grup sistematic la altul.

În regiunile insulare din apropierea Australiei în care este favorizată formarea unor subunităţi ale speciei datorită relativei izolări, numărul de rase geografice la păsări este foarte mare. Astfel s-a constatat că sînt unele specii de păsări, care au cîte 20—30 de rase geografice, existînd chiar o specie, fluierarul auriu (*Pachycephala pectoralis*), care are 70 de rase geografice.

Acelaşi fenomen se observă şi la animalele nevertebrate, la care uneori se formează rase geografice şi populaţii de dimensiuni foarte mici. De pildă, o specie terestră de moluşte din Hawai, *Achatinella mustelina*, posedă 26 subspecii şi peste 60 de rase geografice într-o zonă extrem de redusă de numai 256 km^2.

SEXELE, O MARE INVENŢIE A NATURII

În prezent este bine cunoscut faptul că imensa majoritate a organismelor vii se reproduc pe cale sexuată. Chiar şi organismele procariote, cum sînt de pildă bacteriile, s-a descoperit recent că prezintă indivizi de sex opus şi fenomene de sexualitate.

Care sînt cauzele pentru care sexele au o existenţă aproape universală în natură? De ce organismele vii „preferă" reproducerea pe cale sexuată, altor tipuri de reproducere? Există vreo legătură între adaptarea la mediu, evoluţie şi existenţa sexelor?

Iată cîteva întrebări la care vom încerca să răspundem.

În primul rînd, trebuie arătat că reproducerea sexuată are importanţă biologică deosebită, deoarece ea asigură posibilitatea de *înmulţire a organismelor şi păstrarea*

unui raport relativ constant între sexe. Aceasta este calea cea mai comună şi cea mai eficientă de înmulţire a organismelor, condiţie de bază care le asigură supravieţuirea.

În al doilea rînd, fenomenele de sexualitate determină o vigoare deosebită descendenţei, adică *fenomenul heterozis.* În felul acesta, descendenţii proveniţi din părinţi deosebiţi genetic manifestă o creştere mai rapidă şi mai intensă, au o rezistenţă mai mare la frig, la secetă, la boli şi la alte condiţii nefavorabile de mediu, fapt care de asemenea contribuie la supravieţuirea speciilor.

În sfîrşit, şi nu pe ultimul loc ca importanţă, se situează *fenomenele de recombinare genetică* ce au loc în cursul reproducerii sexuate. Din punct de vedere genetic o mare însemnătate o prezintă aşa-numitele *procese tychice* (*tyché* în limba greacă înseamnă noroc, soartă, şansă) care includ : disjuncţia independentă a cromozomilor şi fenomenul de *crossing-over* din meioză, unirea pe bază probabilistică a gameţilor în cursul fecundării, recombinarea la bacterii şi virusuri. În felul acesta, fiecare individ din cadrul unei populaţii nu moşteneşte programul genetic al părinţilor, ci o combinaţie particulară a programelor genetice ale ascendenţilor.

Ca urmare, fiecare individ reprezintă din punct de vedere genetic o entitate distinctă de toţi indivizii ce alcătuiesc populaţia care în felul acesta manifestă o mare variabilitate. De pildă, pe Terra noastră există circa 4 miliarde de oameni, dintre care nu sînt doi identici din punct de vedere genetic (cu excepţia gemenilor monozigoţi), chiar dacă sînt fraţi buni proveniţi din aceiaşi părinţi. Existenţa recombinării genetice constituie evident o contribuţie esenţială la supravieţuirea speciilor şi la procesul de evoluţie.

Să vedem acum cum sînt determinate genetic sexele.

Fată sau băiat este laitmotivul tuturor părinţilor ce aşteaptă un copil. De aceea oamenii au încercat de multă vreme să răspundă la întrebarea cum sînt determinate genetic sexele. Dezvoltarea furtunoasă a geneticii — ştiinţa eredităţii — în secolul al XX-lea a reuşit să dea răspuns şi la această dificilă întrebare.

Primele cercetări în această direcţie au fost efectuate de citologul german H. Henking încă din 1891, an în care s-a descoperit că gameţii insectelor din genul *Pyrrhocoris* sînt heterogeni ; jumătate posedă nişte corpusculi cromatici pe care i-a denumit X, iar jumătate sînt lipsiţi de aceşti corpusculi. El a legat acest fenomen de diferenţierea genetică a sexelor. Un fenomen similar s-a constatat la specia *Protenor bleifagei* (*fig. 21*).

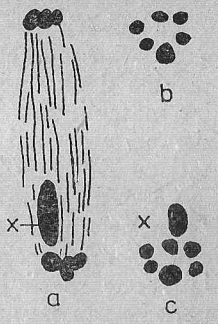

Fig. 21 — Diviziunea meiotică la masculii insectei *Protenor bleifagei* care au $2n = 13$ cromozomi (*a*) şi prin care se obţin două tipuri de gameţi cu $n = 6$ (*b*) şi cu $n = 7$, care are deci un cromozom X în plus (*c*). Femelele acestor insecte au doi cromozomi X şi ca urmare $2n = 14$.

Cel mai răspîndit tip de determinism cromozomal al sexelor este cel descoperit la musculiţa de oţet (*Drosophila melanogaster*) şi care este comun multor specii, printre care tuturor mamiferelor inclusiv omul. La această specie, care are $2n=8$ cromozomi, s-a descoperit existenţa unei perechi de *cromozomi ai sexului sau heterozomi* care sînt identici la femelă (notaţi cu XX) şi diferiţi la mascul (XY). Prin fecundarea unui ovul cu un cromozom X cu un spermatozoid ce conţine tot un cromozom X, rezultă o femelă, iar prin fecundarea unui ovul cu un heterozom X cu un spermatozoid Y, rezultă un mascul, raportul dintre sexe fiind egal şi constant 1 : 1.

La păsări determinismul cromozomal al sexelor este exact opus cu cel al mamiferelor, în sensul că femelele produc două tipuri de ovule, fiind deci heterogametice, iar masculii sînt homogametici producînd un singur tip de spermatozoizi. La aceste specii heterozomii sînt notaţi cu ZW şi ZZ (fig. 22).

La peşti şi amfibieni, cromozomii sexului nu sînt diferenţiaţi morfologic şi ca urmare nu pot fi identificaţi la microscop. În determinismul genetic al sexelor la aceste specii intervin mai multe gene plasate pe o pereche sau pe mai multe perechi de autozomi. Ca urmare, sexele prezintă la aceste specii o anumită labilitate şi în condiţii determinate se poate realiza o inversare a sexelor, adică o transformare a masculilor în femele şi viceversa. De asemenea, la aceste specii există uneori şi indivizi hermafroditi. Determinarea sexelor la peşti şi amfibieni nu este deci cromozomală, ci genică.

La organismele mai puţin evoluate, sexele nu sînt diferenţiate morfologic, ci numai fiziologic, biochimic şi genetic. Astfel, la algele din specia *Chlamidomonas eugametos* gameţii sînt morfologic identici, însă diferiţi din punct de vedere fiziologic şi biochimic, astfel că nu se fecundează între ei decît cei proveniţi de la clone diferite. Studiul acestor gameţi a arătat că factorul fiziologic ce determină diferenţierea gameţilor este dimetilcrocetina, o substanţă chimică relativ simplă, care are doi izomeri în diferite concentraţii. Suşele care au peste 50% izomeri de un tip sînt mascule şi se notează cu (+), iar cele care au sub 50% sînt femele şi se notează cu (—). În general, se fecundează suşele (+) cu cele (—), dar s-a constatat că există 8 tipuri diferite care se pot fecunda între ele, fenomen care a primit denumirea de *sexualitate relativă*.

Foarte interesant de remarcat este că multă vreme bacteriile au fost considerate ca fiind lipsite de fenomene de sexualitate. Relativ recent s-a pus în evidenţă

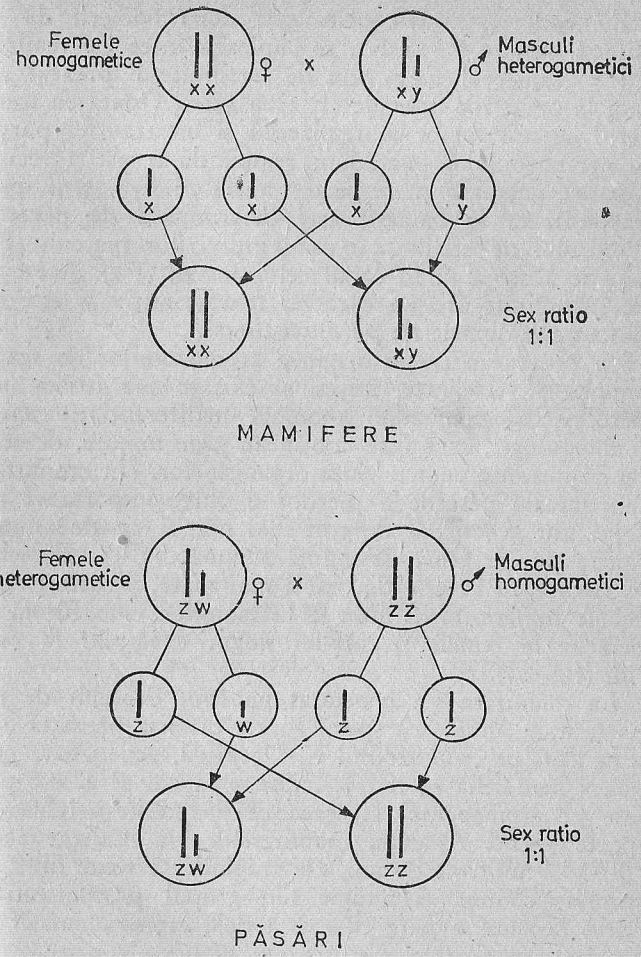

Fig. 22 — Determinismul cromozomal al sexelor la păsări şi mamifere.

fenomenul conjugării prin care două bacterii de sex diferit, notate F^+ și F^-, se cuplează între ele realizîndu-se transferul factorului de fertilitate F prezent numai la bacteriile mascule (F^+ sau Hfr). Odată cu transferul acestui factor se realizează și un transfer parțial al cromozomului bacterian, realizîndu-se astfel recombinarea genetică și respectiv variabilitatea genotipică. Sexualitatea la bacterii este determinată de prezența factorului de fertilitate în cazul indivizilor masculi (F^+) sau de absența sa în cazul celor femeli (F^-). Acest tip de sexualitate are un caracter mai primitiv și este cunoscut sub numele de *parasexualitate.*

În ceea ce privește originea cromozomilor de sex la animalele vertebrate, inițial ei existau sub forma unei perechi de cromozomi omologi nediferențiați genetic și morfologic, care însă conțineau gene majore, deosebit de importante pentru viața organismelor. Un cromozom din această pereche a pierdut o parte importantă din rolul său genetic, a devenit mai mic și conține numai foarte puține gene, devenind cromozomul Y. Perechea sa notată cu X este de obicei mai mare, păstrînd toate genele majore, el aflîndu-se la mamifere sub formă de pereche la femele și într-un singur exemplar la masculi (fig. 23).

La mamifere s-a constatat un fapt deosebit de important, și anume că specii foarte diferite prezintă aceleași gene pe cromozomul X. De pildă, genele care provoacă hemofilia la om, la cîine și la cal se găsesc plasate pe cromozomul X, ceea ce dovedește originea sa foarte veche. Apariția mamiferelor s-a realizat acum 70—135 milioane de ani, ele trăgîndu-se toate dintr-un strămoș comun, și anume din grupul protoinsectivorelor, la care se pare că exista deja cromozomul X cu genele respective.

Analizînd în ansamblu sexualitatea în lumea vie, trebuie remarcat în primul rînd universalitatea fenomenu-

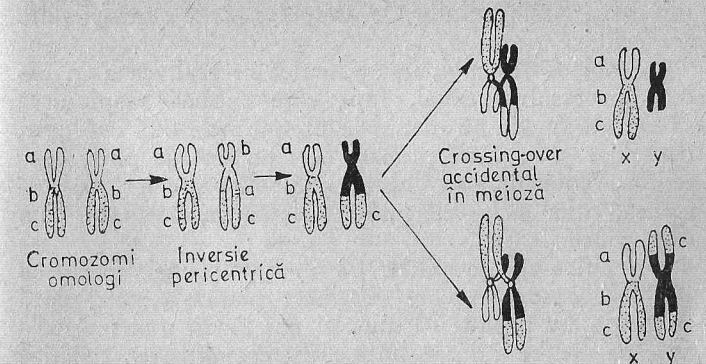

Fig. 23 — Originea cromozomilor neomologi ai sexului X și Y dintr-o pereche de cromozomi omologi, prin restructurări cromozomale.

lui, rolul său biologic extrem de important și manifestarea sa foarte variată la diferite specii aflate în diverse etape ale procesului de evoluție. În sfîrșit, trebuie subliniat că sexele au apărut foarte devreme în cursul evoluției vieții pe Pămînt și, datorită avantajelor ce rezultă pentru descendență din reproducerea sexuată, acest fenomen are în prezent o răspîndire aproape generală.

În timp ce mutațiile, sursă primară a variabilității genetice, sînt produse și acumulate în populații de-a lungul generațiilor, *recombinarea genetică* realizează redistribuirea genelor în cadrul unui număr imens, practic infinit de combinații, adică de genotipuri individuale. *Importanța biologică a fenomenului recombinării genetice este extraordinară, ea determinînd în ultimă analiză circulația informației genetice în cadrul unei populații și diferențierile genotipice între indivizii unei specii.* Prin mutații și recombinare genetică se creează o variabilitate genetică imensă, fapt care consti-

tuie baza posibilităţilor de adaptare şi de supravieţuire a speciilor.

De obicei, recombinarea genetică se realizează în cadrul procesului sexual, fapt care explică răspîndirea sa extraordinară nu numai la organismele mai evoluate, dar chiar şi la unele procariote, cum sînt de pildă bacteriile. Fenomenul recombinării genetice are loc, de asemenea, chiar şi la cele mai simple forme de viaţă, cum sînt virusurile.

S-a calculat, de pildă, că în cazul unei specii cu 10 000 locusuri în care se găsesc plasate genele, dacă în timp s-au produs 10 mutaţii per locus, numărul teoretic de combinaţii rezultate prin recombinarea genetică ar fi de $10^{10\,000}$. Aceasta în timp ce în întreg universul, numărul teoretic de particule subatomice este de 10^{80}. Se poate astfel considera că în fiecare generaţie apare numai un număr mic de combinaţii genotipice în urma recombinării genetice, din numărul teoretic imens de posibilităţi de combinare a genelor. Fiecare fiinţă vie are un genotip care prezintă ceva nou, o constelaţie particulară de gene, diferită de toate celelalte genotipuri şi care reprezintă o experienţă unică a naturii.

Semnificaţia biologică majoră a sexualităţii rezidă tocmai în recombinarea genetică, prin care apar un număr imens de programe genetice individuale, diferite unul de altul, şi care dau posibilitatea organismelor să se adapteze la cele mai variate condiţii de mediu.

Universalitatea fenomenului de recombinare genetică indică existenţa unui important avantaj selectiv. Dacă variabilitatea genetică ar fi produsă exclusiv prin mutaţii, procesul de apariţie de noi genotipuri şi de testare a lor în condiţii variate de mediu ar fi extrem de lent sau ar necesita o frecvenţă foarte mare a mutaţiilor. Datorită însă circulaţiei informaţiei genetice prin recombinarea genetică, mutaţiile apărute la diverşi indivizi pot fi înglobate într-un acelaşi genotip. Ca urmare, apariţia de noi genotipuri are loc cu o frecvenţă extrem de ridicată, în condiţiile în care rata mutaţiilor este relativ scăzută.

Apariţia geneticii populaţiilor, încă din primele decenii ale secolului al XX-lea, a avut o mare însemnătate pentru fundamentarea evoluţionismului modern. În timp ce evoluţioniştii din secolul trecut erau mai ales preocupaţi să descrie procesul filogenetic, istoric, care a dus la succesiunea vieţuitoarelor în decursul timpurilor şi la apariţia speciilor actuale, în epoca modernă, cu ajutorul geneticii populaţiilor, s-a reuşit să se dea o explicaţie ştiinţifică mecanismului evoluţiei, fenomen care nu se realizează la nivelul indivizilor, ci al populaţiilor. În acest fel, genetica populaţiilor a evidenţiat sursele de variabilitate, factorii care modifică frecvenţa genelor în populaţiile panmictice şi rolul mecanismelor de izolare reproductivă în speciaţie.

BAZELE MOLECULARE ALE EVOLUŢIEI

Primele forme de viaţă aveau o structură relativ simplă şi un număr foarte limitat de funcţii care le permiteau autoconservarea şi reproducerea. Odată cu apariţia primelor celule procariote şi ulterior a celulelor eucariote, materia vie s-a complicat şi s-a diversificat considerabil. Ca urmare, pentru a se realiza marea varietate şi complexitate a formelor de viaţă existente astăzi, a fost nevoie de o cantitate crescîndă de informaţie genetică, respectiv de ADN.

Studii recente privind evoluţia cantităţii de material genetic, de la cele mai simple procariote de tip viral la cele mai evoluate eucariote, au demonstrat că de regulă a avut loc o creştere considerabilă a cantităţii de ADN şi respectiv de gene. Astfel, în timp ce unele virusuri

au numai cîteva gene, bacteria *Escherichia coli* are cîteva mii, iar mamiferele cîteva zeci de mii de gene. Iată rezultatul unor analize cantitative privind materialul genetic la cîteva specii de procariote şi eucariote (pag. 85).

În mod evident eucariotele au mai mult ADN decît procariotele, iar între diferitele specii de pro- şi eucariote se observă de regulă o creştere a cantităţii de ADN odată cu mărirea complexităţii organismelor.

Această regulă prezintă însă numeroase excepţii, ceea ce înseamnă că nu întotdeauna o mărire a cantităţii de ADN este corelată şi cu un grad mai mare de complexitate a organismului respectiv. De pildă, unele alge verzi au tot atît ADN sau chiar mai mult decît au unele plante angiosperme, iar la animale unele specii de peşti şi de amfibieni au mai mult ADN decît mamiferele. Evident, aceasta înseamnă că la speciile cu cantităţi prea mari de ADN comparativ cu poziţia lor filogenetică, o parte din materialul genetic este nefuncţional, fapt care a fost pus în evidenţă experimental.

Mecanismele evolutive de creştere a cantităţii de ADN sînt foarte variate şi în acest sens putem cita: duplicaţia şi alungirea genelor, formarea de gene hibride, multiplicarea numărului de genomuri prin poliploidizare sau numai a anumitor cromozomi prin aneuploidizare, restructurări cromozomale etc. (vezi pag. 91). Astfel, ţinînd seama că mamiferele au de circa 1 000 de ori mai mult ADN decît bacteria *Escherichia coli*, aceasta înseamnă că ar fi trebuit să fie peste 10 duplicaţii ale genomului de la bacterii la mamifere, deci o duplicaţie o dată la 3×10^8 ani.

DUPLICAŢIA ŞI ALUNGIREA GENELOR; GENE HIBRIDE

Studiul materialului genetic la diferite specii de plante şi animale a pus în evidenţă existenţa unor gene dupli-

Procariote	Lungimea cromozomului în μm	Nr. de perechi de nucleotide	Eucariote	Nr. haploid de cromozomi	Nr. de perechi de nucleotide/genom
Bacteriofagii R_{17}, F_2 şi MS_2	1,0	3 000	Ciuperca ascomicetă *Neurospora crassa*	7	$8,6 \times 10^7$
Bacteriofagii T_2 şi T_4	54,0	162 000	Alga verde *Chlamidomonas reinhardii*	15	$1,2 \times 10^8$
Virusul vegetal (ARN) Mozaicul tutunului	2,1	6 300	Bobul (*Vicia faba*)	6	$4,4 \times 10^{10}$
Virusul animal *Herpes*	53,0	159 000	Musculiţa de oţet (*Droshophila melanogaster*)	4	$1,7 \times 10^8$
Bacteria *Haemophilus influenzae*	505,0	1 515 000	Cefalocordatul *Amphioxus lanceolatus*	12	1×10^9
Bacteria *Escherichia coli*	1333,0	4 000 000	Porumbelul *Columbia livia*	40	2×10^9
Bacteria *Pseudomonas aeruginosa*	3480,0	10 440 000	Şoarecele *Mus musculus*	20	$6,5 \times 10^9$

cate ce se află într-un număr mare de còpii. Fenomenul de duplicaţie a genelor, prin care apar còpii redundante ale unui anumit locus, a avut un rol important în evoluţie, fapt pus în evidenţă de geneticianul american S. Ohno de la Universitatea din California.

În celulele somatice se găsesc 3 tipuri de ARN, însă ARN ribozomal (ARNr) reprezintă circa 85% din cantitatea totală de ARN. Acest ARNr este la eucariote de 3 tipuri, după mărimea moleculei, determinată prin ultracentrifugare şi măsurată în unităţi Svedberg (S) : 5 S, 18 S şi 28 S. Sinteza acestor fracţii ale ARNr este determinată de 3 gene diferite, care se găsesc de obicei în mai multe còpii. La musculiţa de oţet (*Drosophila melanogaster*) s-a pus recent în evidenţă existenţa în organizatorul nucleolar * a 100 de còpii dispuse în tandem ale unei perechi de gene ce determină sinteza ARNr de tip 18 S şi 28 S, iar la broasca cu gheare (*Xenopus laevis*) numărul de còpii al acestei gene ajunge la 450. În ceea ce priveşte gena implicată în sinteza ARNr de tip 5 S, la broasca cu gheare se găsesc 20 000 de còpii dispuse în tandem.

Se pare că la mamifere este necesară o concentraţie şi mai mare de ribozomi în celule pentru a realiza sinteza proteică. Din această cauză adesea mai multe perechi de cromozomi poartă organizatori nucleolari. De pildă, la om 5 perechi de cromozomi (13, 14, 15, 21 şi 22) sînt prevăzute cu organizatori nucleolari, deci cu gene duplicate care asigură sinteza ARNr. Pentru sinteza ARN solubil (ARNs) există de asemenea mai multe gene în celulele somatice. La *Drosophila melanogaster*, de pildă, au fost puse în evidenţă 60 de gene implicate în sinteza ARNs, fiecare dintre ele aflîndu-se într-un număr de 13 còpii.

* Regiune cromozomală cu rol în formarea nucleolului şi în care se găsesc genele ce determină sinteza ARNr.

Genele duplicate, acumulînd mutaţii, au putut evolua divergent. Apariţia unei noi gene dintr-o copie redundantă a unei gene existente constituie cel mai important rol pe care duplicaţia genelor l-a avut în evoluţie. Cea mai simplă cale de a determina dacă o pereche de gene provine dintr-un strămoş comun este examinarea secvenţei nucleotidelor sau analiza secvenţei aminoacizilor în moleculele proteice codificate de genele respective.

Un exemplu important de evoluţie prin duplicaţia genelor îl constituie enzimele proteolitice, tripsina şi chemotripsina, care sînt produse în pancreas şi secretate în tractul intestinal. Deosebirea cea mai importantă dintre aceste enzime constă în locurile preferenţiale în care ele rup legăturile peptidice ale proteinelor : tripsina rupe legătura dintre aminoacizii lizină şi arginină, iar chemotripsina dintre fenilanină şi tirozină. Studiul comparativ al structurii celor două enzime la bovine a arătat că prima este formată dintr-o secvenţă de 230 aminoacizi iar cea de a doua, din 223 aminoacizi. Secvenţa aminoacizilor în catenele celor două enzime este foarte asemănătoare, fapt care demonstrează originea lor comună. În prezent sinteza celor două enzime este determinată de gene diferite, dar care au o origine comună. Comparaţia regiunilor active ale celor două enzime arată că chemotripsinogenul are o primă regiune activă reprezentată de histidină în poziţia 57 şi o a doua regiune activă în poziţia 195 (serina). Pentru tripsinogen regiunile active sînt în poziţia 46 (histidina) şi în poziţia 183 (serina). Se poate uşor remarca faptul că regiunile lor active sînt distincte, însă asemănătoare, ceea ce demonstrează clar că una dintre gene a apărut într-o copie redundantă a celeilalte.

În mod similar s-a demonstrat că mioglobina din muşchi şi hemoglobina din sînge, care îndeplinesc în

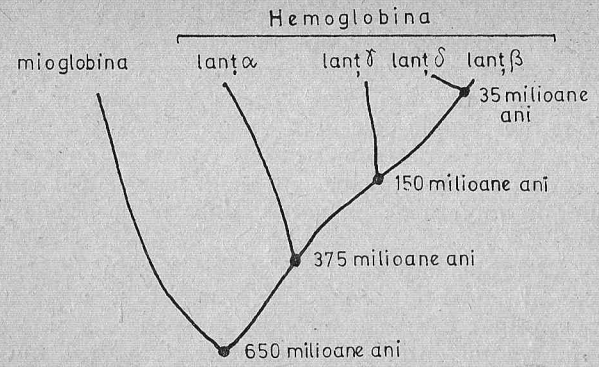

Fig. 24 — Evoluția prin duplicație a genelor ce determină sinteza mioglobinei din celulele musculare și a diferitelor tipuri de hemoglobină din sîngele uman. Pe schemă este marcat și momentul aproximativ cînd s-a produs mutația respectivă.

organism funcții total diferite, au origine comună. Gena care a determinat sinteza primei hemoglobine de la vertebrate a evoluat probabil din gena duplicată a mioglobinei (fig. 24). Cercetările efectuate prin difracție în radiații X au arătat că atît catena de hemoglobină, cît și cea de mioglobină sînt înfășurate în jurul grupului hem într-un mod aproape identic. Astfel, la mioglobină, moleculele de histidină din pozițiile 64 și 93 sînt cuplate cu grupul hem, în timp ce la hemoglobină acest fenomen se realizează tot cu histidina dar în pozițiile 58 și 87. Studiul comparativ al secvenței aminoacizilor în catenele polipeptidice de mioglobină și hemoglobină arată de asemenea originea comună a celor două proteine. Deosebirea cea mai importantă între aceste proteine constă în faptul că mioglobina a rămas un monomer, iar hemoglobina a devenit un tetramer.

Pasul următor în evoluția hemoglobinei îl constituie apariția catenelor de tip α, care sînt formate din 141

aminoacizi. Apariția lor se datorează probabil tot fenomenului de duplicație a genelor, urmat de o deleție a unui segment al catenei. În timp ce catenele de tip β sînt capabile să se polimerizeze și să formeze autotetrameri, catenele de tip α n-au această capacitate. Ele însă formează împreună cu catenele β o moleculă de hemoglobină foarte eficientă, alcătuită din 4 catene (două de tip α și două de tip β). Între catenele de tip α și β există diferențe mari în ceea ce privește secvența aminoacizilor; 48 aminoacizi diferiți la oaie, 84 la cal și la om. Aceasta arată că apariția genei ce determină sinteza catenei α a hemoglobinei, dintr-o genă redundantă a catenei β, s-a produs devreme în evoluția vertebratelor. Într-adevăr, catenele α ale hemoglobinei au apărut cu mult înainte de formarea mamiferelor, astfel de catene putînd fi evidențiate chiar și la unele specii de pești teleosteeni, cum este crapul.

Mecanismele prin care s-a produs duplicarea genelor și apariția copiilor redundante sînt foarte variate. S. Ohno (1970) enumeră următoarele mecanisme: schimburi inegale între cele două cromatide ale aceluiași cromozom, *crossingover*-ele inegale între cromozomii omologi, replicația regională redundantă a ADN etc. În ce privește, de pildă, replicația regională redundantă, se consideră că apariția genomului la peștele cu plămîni sud-american, de 35 de ori mai mare decît al mamiferelor, s-a produs pe această cale.

În unele cazuri nu are loc o duplicare totală a genei, ci numai a unei anumite regiuni ale sale, fapt care determină *alungirea genelor*. Astfel *haptoglobina* din sîngele uman este alcătuită, la fel ca hemoglobina, din două catene α și două catene β. Mai mult, s-a constatat că există două tipuri de catene α, notate α^1 și α^2, iar tipul α^1 are la rîndul său două variante: F cu aminoacidul lizina în poziția 54 și S cu acidul glutamic în aceeași poziție. S-a demonstrat că tipul α^2 este for-

mat dintr-o secvență de 143 aminoacizi, iar tipul α^1 din 84 aminoacizi. Studiul secvenței aminoacizilor a demonstrat că gena mai lungă ce determină sinteza catenei α^2 provine din reunirea prin *crossing-over* inegal a celor două gene mai scurte care determină sinteza variantelor F și S. Iată deci cum pornindu-se de la două gene mai scurte ce codifică cîte 84 aminoacizi s-a ajuns prin duplicare parțială la o genă mai lungă ce codifică 143 de aminoacizi.

În sfîrșit, cantitatea de material genetic se poate mări și prin *hibridarea genelor*. Ca urmare, din două gene mai scurte prin hibridare poate apărea o genă mai lungă. Astfel, la unii oameni s-a identificat o genă care determină sinteza unei hemoglobine anormale denumită Lepore. S-a constatat că această genă provine prin hibridarea între gena ce determină sinteza catenei β a hemoglobinei umane de la adult și gena ce determină sinteza catenei δ de la adult, dar care se găsește în cantitate foarte mică. Gena hibridă este formată dintr-o parte a genei pentru catena β și o parte a genei pentru catena δ.

Studiul comparativ al mioglobinei și diverselor tipuri de hemoglobină a dus la realizarea unui adevărat arbore filogenetic privind evoluția acestor molecule. Astfel, separarea hemoglobinei din mioglobină prin duplicare genică s-a produs acum circa 1 100 milioane de ani, înaintea apariției animalelor vertebrate. Prima proteină de tipul hemoglobinei era formată dintr-o singură catenă și ea există și în prezent la unele vertebrate inferioare de exemplu la mreană.

Un pas mai departe în evoluția hemoglobinei l-a constituit o altă duplicație a genei respective, prin care s-au format catenele α și β, care se unesc două cîte două și constituie hemoglobina tetramerică de la toate speciile de mamifere. Mai tîrziu gena pentru catena β a hemoglobinei s-a duplicat din nou și a dat

naștere catenei γ care este sintetizată în organismul fătului. În fine, printr-o altă duplicație, care se pare că a avut loc la începutul diferențierii primatelor, gena β a dat naștere genei pentru catena δ. Ca urmare, majoritatea primatelor au această genă, cu excepția maimuței *Rhesus*. Iată deci un exemplu foarte sugestiv cum dintr-o singură genă pentru mioglobină prin duplicații succesive au apărut mai multe gene care au determinat mărirea cantității de ADN și au dus la apariția de funcții noi la organismele mai evoluate.

EVOLUȚIA PRIN POLIPLOIDIZARE, ANEUPLOIDIZARE ȘI RESTRUCTURĂRI CROMOZOMALE

Fenomenul de duplicație a materialului genetic depășește uneori nivelul genelor, el avînd loc la nivel de cromozomi (*aneuploidie*) sau chiar de genomuri (*poliploidie*).

Poliploidia este fenomenul de multiplicare a întregului genom, alcătuit din numărul de bază de cromozomi notat cu x, deci a tuturor genelor. În funcție de gradul de multiplicare a genomului, organismele pot fi diploide ($2x$), triploide ($3x$), tetraploide ($4x$), pentaploide ($5x$), hexaploide ($6x$) etc., avînd deci o cantitate dublă, triplă, cvadruplă etc. de ADN.

În general, fiecărei specii eucariote îi este caracteristic un anumit număr de cromozomi, dublu în celulele somatice ($2n$) și simplu (n) în celulele sexuale. De la această regulă există însă numeroase excepții, astfel că nu se poate vorbi decît de o constanță relativă a numărului de cromozomi. De pildă, stuful (*Phragmites communis*) reprezintă o specie complexă, în cadrul căreia diferite populații și clone au $2n=36$ ($3x$), 48 ($4x$), 72 ($6x$), 84 ($7x$) și 96 ($8x$), toate aceste numere fiind multipli ai unui număr de bază $x=12$. De asemenea,

au fost identificate clone ce prezintă o mare variație a numărului de cromozomi în jurul tipului cu $2n=48$, avînd $2n=44$, 46, 49, 50, 52.

În cadrul genului *Narcisus* specia *N. bulbocodium* formează o *serie poliploidă intraspecifică* ($2x$, $3x$, $4x$, $5x$, $6x$), numărul de bază (x) fiind de 7. Un fenomen similar de *polimorfism cromozomal intraspecific* a fost pus în evidență și la animale. De pildă, orbetele (*Spalax leucodon*) prezintă populații izolate geografic care au $2n=46$, 50, 54, 56 cromozomi. Exemple de acest fel, reprezentînd serii poliploide și aneuploide intraspecifice, sînt relativ numeroase (fig. 25).

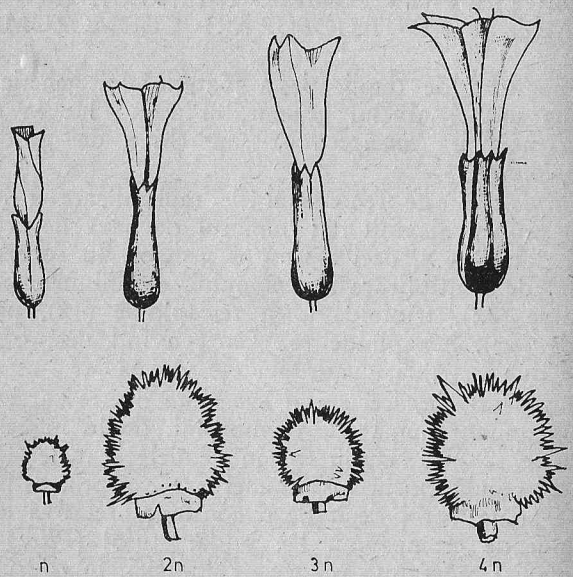

Fig. 25 — La ciumăfaie *(Datura stramonium)* există forme cu genomuri diferite: haploide (n), diploide ($2n$), triploide ($3n$) și tetraploide ($4n$) care prezintă o variație corespunzătoare a florilor (sus) și capsulelor (jos).

Mult mai numeroase sînt însă cazurile de *serii poliploide interspecifice.* În cadrul genului *Triticum*, de exemplu, există specii diploide ($2n=14$), cum este *T. monococcum*, tetraploide ($2n=28$), cum este *T. dicoccum* și *T. durum*, și hexaploide ($2n=42$), cum este *T. aestivum.* În genul *Festuca* există specii cu $2n=14$, 21, 28, 35, 42, 56, 70 cromozomi care sînt deci $2x$, $3x$, $4x$, $5x$, $6x$ și $10x$). Genul *Rosa* cuprinde 178 de specii distribuite în nordul zonei temperate avînd numărul de bază de cromozomi $x=7$. Speciile acestui gen constituie un exemplu clasic de serie poliploidă. Se consideră că nivelul optim de poliploidie pentru acest gen este cel tetraploid avînd florile mari, spre deosebire de unele forme octoploide, mai puțin frecvente și care nu prezintă interes pentru horticultură. De asemenea, menționăm că genul *Chrysanthemum* cuprinde 200 de specii, dintre care unele alcătuiesc o serie poliploidă cu $2n=18$, 27, 36, 45 etc. cromozomi, care sînt deci $2x$, $3x$, $4x$ și $5x$. La angiosperme seriile poliploide interspecifice prezintă o frecvență destul de mare.

Serii poliploide au fost evidențiate și în cadrul regnului animal, la nevertebrate și vertebratele inferioare la care mecanismul cromozomal de determinare a sexelor nu este bine diferențiat. Un exemplu cert de serie poliploidă printre vertebrate îl oferă unele specii de amfibieni din cadrul familiei *Ceratophrydidae.* Astfel, s-a constatat că specia *Odontophrynus cultripes* cu $2n=22$ cromozomi este diploidă, iar broasca sud-americană (*O. americanus*) cu $2n=44$ cromozomi este tetraploidă. În sfîrșit, specia *Ceratophrys dorsata*, din aceeași familie, are $2n=104$ cromozomi fiind un octoploid ($8x$) ce provine prin multiplicarea numărului de genomuri ale speciei diploide *Ceratophrys pierotti* ($2n=26$). Evident că prin poliploidizare are loc uneori o schimbare profundă de ordin anatomomorfologic, fiziologic și bio-

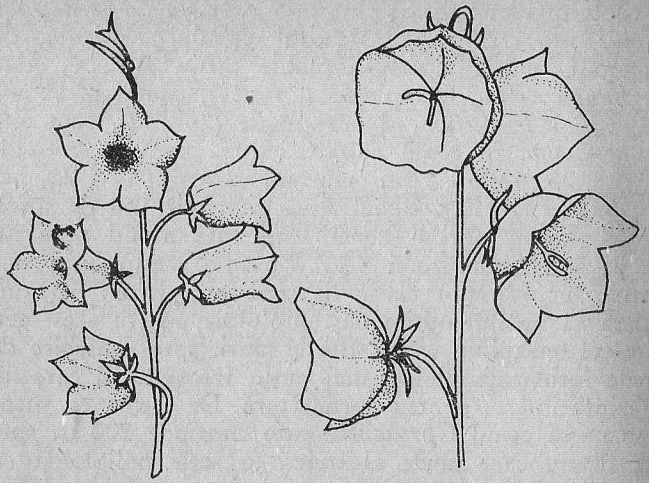

Fig. 26 — Flori de campanulă diploidă ($2n$) și tetraploidă ($4n$). Se observă că prin poliploidizare au crescut considerabil dimensiunile florilor.

chimic a organismelor respective, care devin astfel specii noi (fig. 26).

Un rol mai puțin important în procesul de speciație l-a jucat fenomenul de *pseudopoliploidie* prin care s-a realizat mărirea numărului de genomuri prin fragmentarea generală a cromozomilor, deci fără o mărire corespunzătoare a cantității de ADN. Studii recente au demonstrat existența pseudopoliploizilor atît la plante, mai ales la gimnosperme, cît și la animale. La plante, de pildă în genul *Luzula*, există specii diploide ($2n=6$), tetraploide ($2n=12$), octoploide ($2n=24$) și 16—ploide ($2n=48$), apărute printr-un proces de fragmentare generală a cromozomilor, după cum șoarecele de nisip

originar din Africa (*Tatera brantsii draco*) este o specie diploidă ($2n=36$), iar șoarecele de nisip originar din India (*Tatera indica ceylonica*) este un tetraploid ($2n=72$) apărut pe aceeași cale. Sub influența unor factori exogeni sau endogeni are loc fragmentația cromozomilor, în special a celor cu centromeri difuzi sau multipli, realizîndu-se astfel creșterea numărului de genomuri prin fenomenul de pseudopoliploidie.

În unele cazuri mărirea cantității de ADN se realizează nu prin multiplicarea genomurilor sau anumitor cromozomi, ci prin mărirea sau mai bine spus prin *alungirea cromozomilor*. Fenomenul a primit denumirea de *criptopoliploidie*. De exemplu, s-a constatat că ceapa obișnuită (*Allium cepa*) ($2n=16$) are cu 27% mai mult ADN decît o altă specie de ceapă (*A. fistulosum*) care are același număr de cromozomi ($2n=16$).

Un fenomen similar s-a constatat în genul de plante *Vicia*, la care bobul (*V. faba*) are o cantitate relativă de ADN egală cu 100, specia *V. hybrida* are 50,93%, iar măzărichea (*V. sativa*) are numai 18,54%, deci mai puțin decît a cincia parte din ADN-ul bobului. Toate aceste specii au $2n=12$ cromozomi. La animale un astfel de fenomen s-a observat la 3 specii de broască rîioasă : *Bufo bufo*, *B. viridis* și *B. calamitas* care au toate $2n=22$ cromozomi, dar dimensiunile lor și deci cantitatea de ADN este diferită, variind în raportul următor : 1,49 : 1,07 : 1,00 (fig. 27).

Mecanismul de mărire a lungimii cromozomilor prin criptopoliploidie nu este prea bine cunoscut, însă se consideră că probabil a avut loc o duplicare repetată a anumitor secvențe din macromolecula de ADN care a dus la apariția așa-numitului *ADN-repetitiv*. Mai ales la speciile cu cromozomi mai mari, cantitatea de ADN repetitiv a crescut considerabil, așa cum se observă din tabelul de mai jos, care cuprinde cantitățile de ADN repetitiv la mai multe specii de amfibieni :

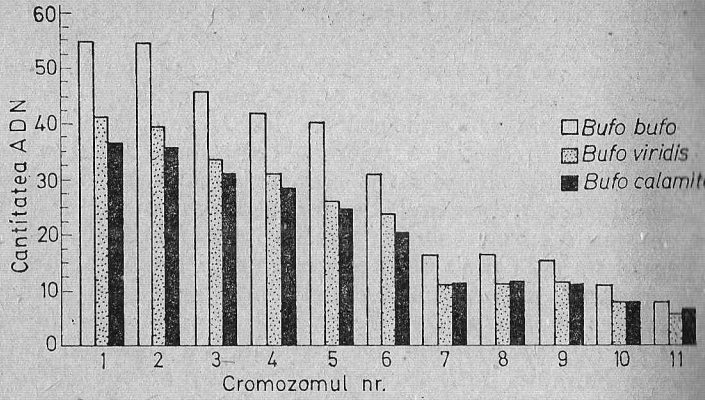

Fig. 27 — La 3 specii de broască rîioasă *(Bufo bufo, B. viridis* și *B. calamitas)* numărul de cromozomi este identic, fiind $n = 11$. Dimensiunea cromozomilor și cantitatea de ADN în fiecare cromozom sînt foarte variabile, așa cum se vede din grafic.

Genurile	Cantitatea de ADN, în pg per genom	Nr. de perechi nucleotide	ADN-repetitiv, în %
Scaphiosus	1,2	$1,1 \times 10^9$	40
Engystonops	2,7	$2,5 \times 10^9$	50
Xenopus	3,0	$2,7 \times 10^9$	45
Bufo	5,0	$4,6 \times 10^9$	80
Rana	8,0	$7,3 \times 10^9$	78
Amblystoma	42,0	$3,8 \times 10^{10}$	80

Din tabel se poate ușor remarca faptul că odată cu creșterea cantității totale de ADN per genom, o parte tot mai importantă din acesta este constituită din secvențe repetitive de ADN care într-o anumită măsură este nefuncțional (fig. 28).

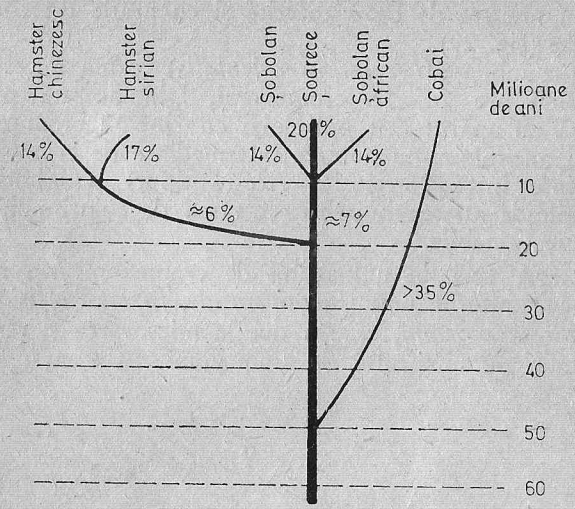

Fig. 28 — Creșterea cantității de ADN repetitiv în cursul evoluției animalelor rozătoare (după *N. R.* Rice, 1972).

În cazul *aneuploidiei* a avut loc o multiplicare parțială a cantității de ADN din genom, în sensul că numai unii cromozomi în loc să se găsească sub forma de pereche, se pot găsi în 3 sau 4 exemplare. Uneori la aneuploizi are loc o reducere a numărului de cromozomi, în sensul că dintr-o pereche poate lipsi unul sau ambii componenți ai săi. Fenomenul aneuploidiei a avut o mare importanță pentru evoluția speciilor, atît la plante cît și la animale.

La plante, de pildă, este cunoscut cazul genului *Brassica* în care există specii ce au un număr de bază $x = 8, 9, 10, 11$ ce au apărut prin aneuploidie. În acest gen, din care fac parte varza, rapița, napul etc., prin aneuploidie și poliploidie au apărut numeroase spe-

cii cu numere de bază diferite şi cu grade diferite de ploidie (fig. 29).

La zambilă (*Hyacinthus orientalis*) forma ancestrală diploidă are $2n=16$ cromozomi. Din această primă formă au apărut atît poliploizi cu $2n=32$ cromozomi, cît şi aneuploizi cu numere intermediare de cromozomi cuprinse între 16 şi 32. Aceste tipuri poliploide şi aneuploide au servit pentru crearea de soiuri noi, valoroase şi stabile.

Uneori variaţia numărului de cromozomi s-a realizat cu ajutorul unui *mecanism de fuzionare/fisionare a unor cromozomi*, care a dus la micşorarea şi respectiv mărirea numărului de cromozomi. În esenţă, fenomenul constă fie în fisionarea centromerului unui cromozom cu două braţe şi formarea a doi cromozomi cu un singur braţ, fie în procesul opus, al fuzionării centromerilor a doi cromozomi cu cîte un braţ ce dau astfel naştere unui cromozom cu două braţe. Studii de citogenetică comparativă au demonstrat că multe specii vegetale şi animale din cadrul unui ordin, al unei familii sau al unui gen au apărut pe această cale. Deşi au un număr variat de cromozomi, toate aceste specii au acelaşi *număr fundamental* (NF) de braţe cromozomale şi aceeaşi cantitate de ADN. Fenomenul acesta a fost pus în evidenţă pentru prima dată în anul 1916 de către W. R. B. Robertson care a demonstrat posibilitatea apariţiei de specii noi printr-un proces de *fuzionare/fisionare cromozomală*. Speciile înrudite ce au acelaşi NF dar număr de cromozomi diferit alcătuiesc o aşa-numită *serie robertsoniană* (fig. 30).

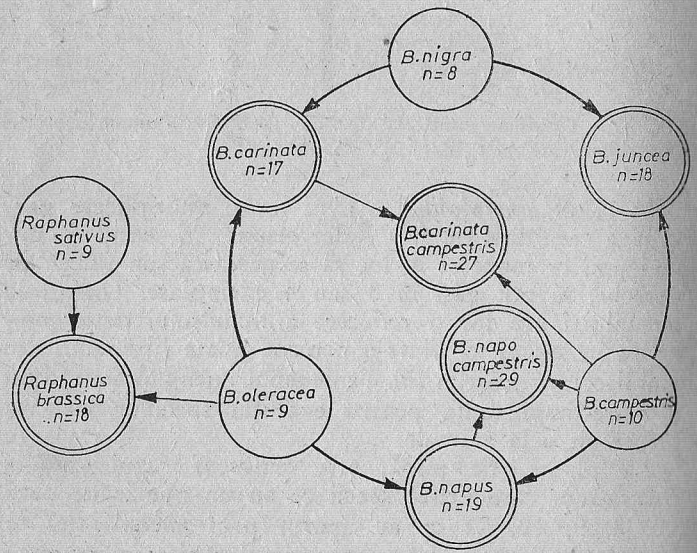

Fig. 29 — Evoluţia prin aneuploidie şi poliploidie a genului *Brassica* a determinat apariţia a numeroase specii.

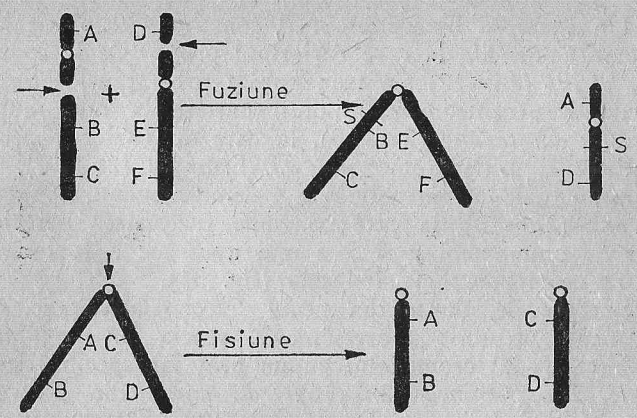

Fig. 30 — Prin fuziune/fisiune cromozomală de tip robertsonian se poate micşora sau mări numărul total de cromozomi.

Un exemplu binecunoscut îl constituie genul de insecte *Drosophila* la care cariotipul primar de la specia *D. virilis* ($2n=12$) s-a transformat prin translocaţie şi fuzionarea centromerilor, dînd naştere la mai multe specii : *D. texana* ($2n=10$), la care au fuzionat perechile 2 şi 3 de cromozomi, *D. littoralis* ($2n=10$), la care au fuzionat perechile 3 şi 4 de cromozomi, *D. americana* ($2n=10$), la care pe lîngă fuzionarea perechilor de cromozomi 2 şi 3 a mai avut loc o fuzionare între cromozomul 1 şi 4 etc. (fig. 31).

Speciile de plante din genul *Lycoris* alcătuiesc, de asemenea, o serie robertsoniană, specia *L. sanguinea* avînd $2n=22$ cromozomi cu un braţ iar speciile derivate, *L. straminea* ($2n=16$) *L. aurea* din Taiwan ($2n=14$) şi *L. aurea* din Japonia ($2n=12$), avînd un număr variat de cromozomi cu două braţe. Un alt exemplu poate fi observat în fig. 32.

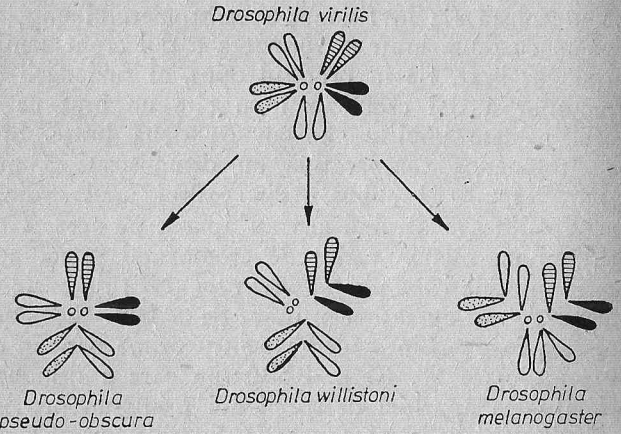

Fig. 31 — Prin restructurări cromozomale din cariotipul primar al speciei *Drosophila virilis* au rezultat alte specii cu cariotipuri diferite.

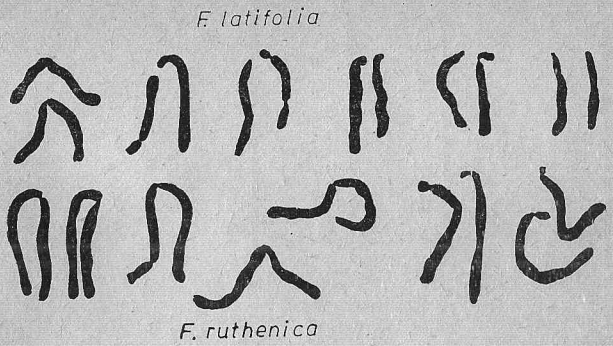

Fig. 32 — Evoluţia cariotipului prin restructurări de tip robertsonian în genul de plante *Fritillaria*: specia *latifolia* are 2 cromozomi cu două braţe şi 10 cu un braţ, iar specia *ruthenica* are 5 cromozomi cu două braţe şi 4 cu un braţ, în ambele cazuri numărul fundamental (NF) este egal cu 14.

Restructurarea cromozomilor, realizată prin pierderea unor segmente cromozomale (*deleţie*), prin dublarea unui segment (*duplicaţie*), prin inversarea poziţiei unui segment şi schimbarea deci a ordinii genelor (*inversie*) şi prin transferul unui segment de la un cromozom la altul (*translocaţie*), a contribuit la procesul de speciaţie (fig. 33). Astfel, studiul cromozomilor la 160 de specii de lăcuste australiene din subfamilia Morabinae l-a dus pe profesorul M. J. D. White (1965) la concluzia că toate provin dintr-un *cariotip primitiv*. În total au fost identificate un număr de 34 fuzionări şi 20 fisionări cromozomale în filogenia acestor specii. De asemenea, au fost identificate 8 fuzionări ale cromozomilor sexului care au dus la transformarea tipului de determinism genetic al sexelor.

Pe baza generalizării rezultatelor unor cercetări similare se consideră că la animale are loc un fenomen de *ortoselecţie a cariotipului*, prin care se înţelege faptul

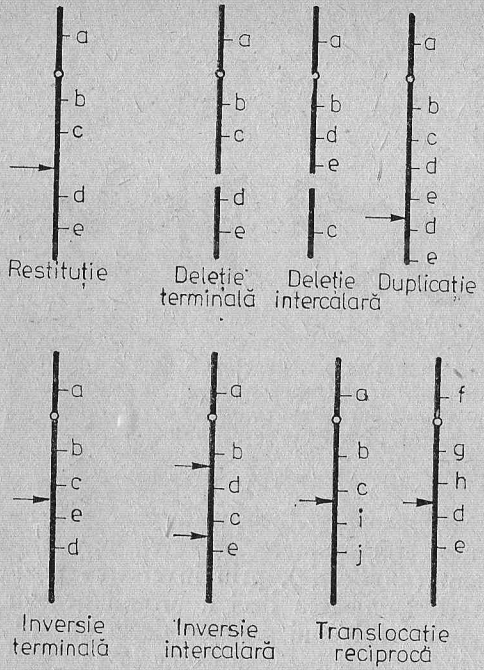

Fig. 33 — Cîteva tipuri de restructurări ale unor cromozomi pe care, cu litere, sînt marcate diferite gene.

că într-o anumită linie filogenetică au loc numeroase fisiuni repetate de cromozomi, în altă linie fuzionări repetate, într-o altă linie inversii pericentrice etc. (fig. 34). De pildă, fluturele *Lysanda nivescens* are $2n=380$ sau 382, în timp ce numărul normal pentru familia *Lycaenidae* este de $2n=46$ sau 48. În acest caz, fenomenul poliploidiei fiind exclus, mărirea numărului de cromozomi s-a realizat prin „disocierea" succesivă a cromozomilor cariotipului inițial și prin translocații.

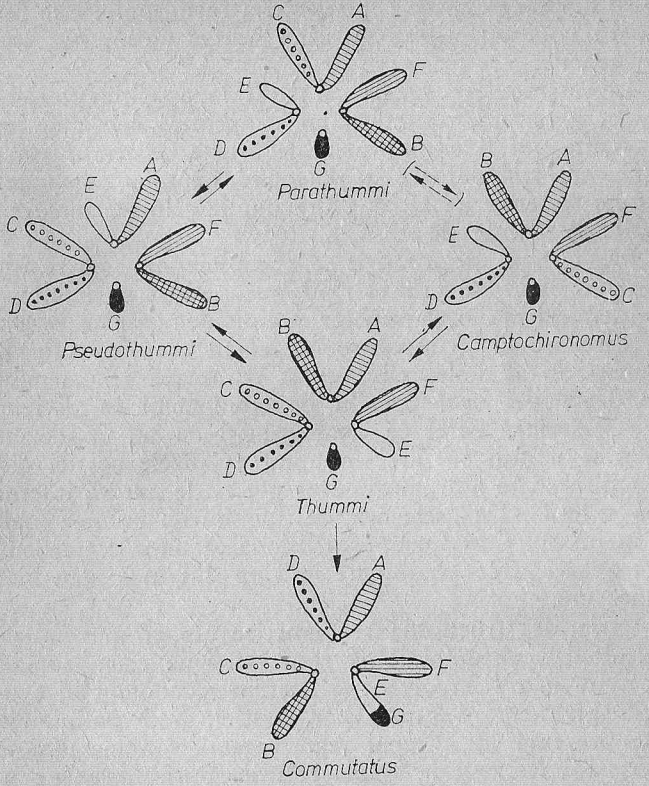

Fig. 34 — Prin restructurări ale cromozomilor au apărut diferite specii în genul de insecte *Chironomus*.

Un exemplu opus îl constituie lăcusta *Dichroplus silveirognidai* care are $2n=8$, în timp ce tipul primitiv din care provine are $2n=24$. Reducerea numărului de cromozomi s-a realizat în acest caz prin 8 fuziuni cromozomale și 6 inversii pericentrice succesive. Rezultatul

final al procesului de ortoselecție a cariotipului este formarea unor cariotipuri specifice pentru un anumit grup filogenetic.

În ce privește cauzele care duc la apariția poliploizilor în natură, s-a constatat că printre cele mai importante pot fi citate variațiile bruște de temperatură, influența stimulatoare a polenului exogen, substanțele toxice secretate de insecte, diviziunile celulare din țesuturile de regenerație etc.

Mecanismul de apariție a aneuploizilor este relativ bine cunoscut. În primul rînd, aneuploidia se manifestă în descendența organismelor poliploide apărute recent, la care are loc o separare neegală a cromozomilor în gameți. În al doilea rînd, ea se datorează fenomenului nondisjuncției unei perechi de cromozomi în diviziunea meiotică, astfel că apar gameți cu un cromozom în plus și alții cu unul în minus. Cauzele acestei disjuncții eronate a cromozomilor pot fi de natură internă sau externă. De asemenea, restructurările cromozomale și în primul rînd fuzionarea/fisionarea unor cromozomi pot avea cauze variate care însă nu sînt încă prea bine cunoscute.

Variațiile structurale și numerice ale cromozomilor, poliploidia, aneuploidia și restructurările cromozomale au avut un rol important și unanim recunoscut în evoluția plantelor și animalelor. Astfel, deși poliploidia este prezentă în întregul regn vegetal, fenomenul este mult mai frecvent la Angiospermae. Pornindu-se de la considerentul că numărul de bază de cromozomi (x) la majoritatea speciilor trebuie să fi fost cuprins între 7 și 9, se consideră că numerele de cromozomi mai mari de 14 sînt în anumite limite poliploide. Pe această bază s-a estimat că dintre speciile studiate, 43% (aproape 12 000 de specii) dintre Dicotiledonatae și 58% (peste 5 000 de specii) dintre Monocotiledonatae sînt poliploide. Aceste estimări dau o medie de 47% poliploizi

printre Angiospermae. Se apreciază, de asemenea, că 75% dintre Gramineae sînt poliploide și că poliploidia are o frecvență mare în familiile: Rosaceae, Polygonaceae, Malvaceae, Crasulaceae, Nymphaceae și altele. Dintre plantele de cultură, grîul, ovăzul, cartoful, bumbacul (fig. 35), tutunul, lucerna și cele mai multe dintre plantele furajere sînt poliploide.

Este unanim acceptat faptul că *speciile poliploide de plante au o capacitate mai mare de adaptare* decît speciile diploide. Această capacitate crescută de

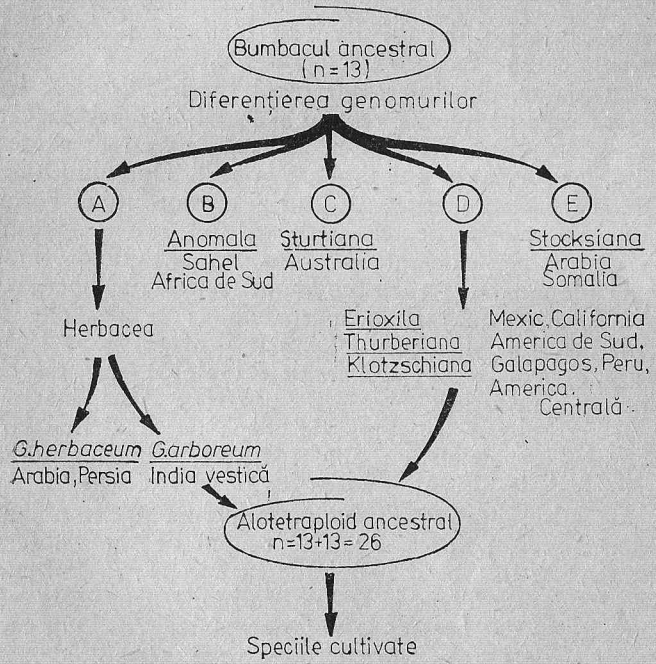

Fig. 35 — Evoluția bumbacului (genul *Gossy pium)* prin poliploidizare și diferențierea genomurilor.

adaptare este foarte evidentă la poliploizii naturali care au fost supuși selecției o lungă perioadă de timp după ce au apărut. Același efect îl are poliploidia și la animale la grupele la care poliploidia s-a stabilizat. Adaptabilitatea mai mare a formelor poliploide s-ar putea atribui unei măriri a numărului de gene per locus, de la două la formele diploide la 3, 4, 5, 6 etc. la cele poliploide. Fenomenul heterozis este mult mai stabil la poliploizi și dezvoltarea formelor de reproducere vegetativă a contribuit la o oarecare independență a individului în relația cu mediul biotic, îndeosebi față de cel reprezentat de alți indivizi din aceeași specie, la speciile care se fecundează încrucișat.

La plante, este interesant cazul speciei *Biscutela laevigata* care populează centrul și sudul Europei, la care forma $4n$ este distribuită pe întreaga suprafață a arealului, iar forma $2n$ este limitată la văile Oderului, Elbei, Dunării și ale anumitor afluenți ai acestor fluvii. Forma diploidă, mai veche, se crede că și-a restrîns arealul în timpul perioadei glaciare, iar cea tetraploidă, mult mai adaptabilă, s-a răspîndit pe suprafața liberă de gheață, forma $2n$ fiind incapabilă să se dezvolte în noile condiții. Un exemplu similar îl oferă specia *Valeriana officinalis* la care formele diploide sînt răspîndite în zonele de cîmpie ale Europei și Asiei, iar formele tetraploide și octoploide ocupă un areal mai larg populînd și zonele cu climat foarte uscat, cu soluri acide și de la altitudine mare.

În cadrul genului *Primula* poliploidia a determinat, de asemenea, lărgirea arealului ocupat de speciile acestui gen. Astfel, speciile diploide cu $2n=18$, *P. farinosa*, *P. frondosa*, *P. modesta* din regiunile temperate ale Eurasiei au dat naștere la autotetraploizi ($2n=36$), care încrucișîndu-se au format noi specii tetraploide, ca *P. longiflora* și *P. yuparensis*, răspîndite și în regiunile montane. Speciile hexaploide ($2n=54$), octoploide

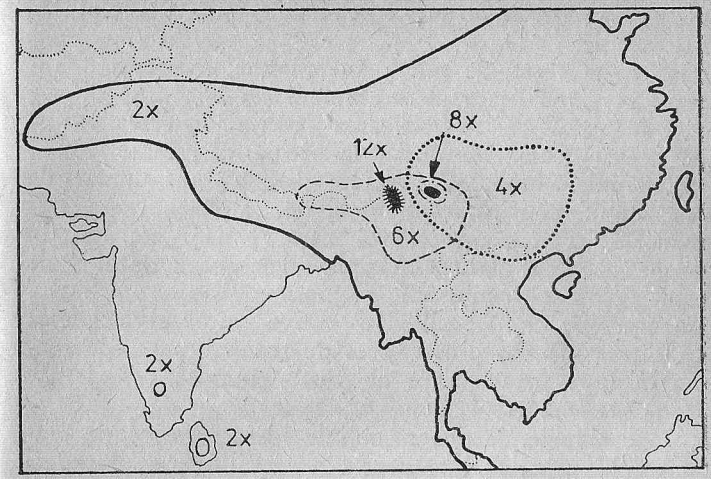

Fig. 36 — Harta distribuției poliploizilor la *Rhododendron* în Asia (după J. Ammal, 1950).

($2n=72$) și cele 14—ploide ($2n=126$) ocupă arealuri noi în regiunile arctice și în America. Un fenomen asemănător a avut loc și la genul *Rhododendron* (*fig. 36*).

La animale, în special la insecte și la alte nevertebrate, speciile poliploide tind să fie cosmopolite, în timp ce speciile diploide sînt endemice, cu o suprafață restrînsă de răspîndire. La *Artemia salina* forma decaploidă are capacitatea de a popula ape cu o concentrație foarte ridicată de săruri, concentrație ce depășește de cîteva ori pe cea a Mării Moarte.

În timp ce poliploidia determină multiplicarea numărului de genomuri și o redundanță a întregului material genetic, aneuplodia precum și diferite alte tipuri de restructurări cromozomale au avut drept consecință realizarea unei redundanțe parțiale a materialului ge-

netic. Ca urmare şi aceste fenomene au avut rolul lor în evoluţie.

În ce priveşte, de pildă, aneuploidia, existenţa a numeroase genuri care au un număr de bază (x) diferit atestă faptul că diversificarea speciilor s-a realizat şi pe această cale. De pildă, la specia de plante *Draba verna* există populaţii variate care au un număr de cromozomi cuprins între 14 şi 64, la *Poa alpina*, numărul de cromozomi variază între 31 şi 57 etc. Atît la unele specii de plante, cît şi la unele specii de animale este cunoscut *fenomenul de polimorfism cromozomal intraspecific.* La speciile respective se observă adesea că ele se află în plin proces de transformare, de speciaţie, fapt pentru care au fost denumite *„species in statu nascendi"*.

În concluzie, se poate sublinia ideea că evoluţia materialului genetic şi respectiv a speciilor de plante şi animale s-a realizat prin mecanisme foarte variate, care includ variaţiile numerice şi structurale ale cromozomilor. Aceste variaţii au fost însoţite de o creştere a cantităţii de material genetic şi respectiv a redundanţei genelor, fapt care a făcut posibilă apariţia de noi gene şi diversificarea funcţiilor lor, favorizînd o specializare superioară a organismelor şi o adaptare mai bună la condiţiile de mediu. S-a realizat astfel procesul de speciaţie şi respectiv de evoluţie.

EVOLUŢIA NONDARVINISTĂ

Teoria sintetică a evoluţiei, care îmbină darvinismul cu cercetările actuale de genetică, consideră că mutaţiile şi recombinarea genetică au un rol important în apariţia variabilităţii genotipice a organismelor, însă în conformitate cu darvinismul numai selecţia naturală hotărăşte care dintre mutaţii vor fi eliminate şi care

vor fi păstrate, intrînd în patrimoniul genetic al noilor specii.

Cercetările din ultimii ani, mai ales privind codul genetic, sinteza proteică, secvenţa aminoacizilor în catenele polipeptidice etc., au constituit premisele pentru apariţia unui domeniu al biologiei care poate fi denumit *evoluţia moleculară* şi care studiază modul cum se produce evoluţia în special la nivelul macromoleculelor de acizi nucleici şi proteine, principalii constituenţi ai materiei vii. Aceste cercetări au dus la concluzia că un rol relativ important în dezvoltarea naturii vii îl are şi *evoluţia nedarvinistă.* Astfel, studiul acizilor nucleici şi al proteinelor a arătat că permanent se produc cu o frecvenţă relativ mare *mutaţii neutre ale genelor* care nu afectează aparent capacitatea lor funcţională.

Studii aprofundate privind hemoglobina umană au dus la identificarea unui număr de 94 mutaţii care afectează cele două tipuri de catene polipeptidice (α şi β) şi care constau din înlocuirea cîte unui singur aminoacid, din cei circa 600 cîţi există în molecula de hemoglobină. S-a calculat însă că numărul teoretic posibil de substituiri ale aminoacizilor în molecula de hemoglobină este mult mai mare, şi anume de 2217. Marea majoritate a acestor substituiri de aminoacizi sînt rezultatul unor mutaţii neutre, care nu afectează capacitatea funcţională a hemoglobinei, ci determină numai un polimorfism accentuat al său. Pe această bază se estimează că în populaţia umană, de circa 4 miliarde de indivizi, există un total de circa 5 milioane de variante de hemoglobină. Există temeiuri experimentale să considerăm că toate aceste variante ale hemoglobinei există în populaţia globului nostru.

În mod similar s-a evidenţiat că şi la nivelul acizilor nucleici se produc permanent mutaţii neutre, mutaţii care modifică informaţia genetică şi se reflectă

oarecum pasiv în structura catenelor polipeptidice, fără a le afecta funcţionalitatea. Codul genetic este alcătuit din 64 codoni care codifică cei 20 de aminoacizi, fiind un cod degenerat. Aceasta înseamnă că mai mulţi codoni pot codifica un acelaşi aminoacid. Ţinînd seama că fiecare codon este format dintr-o secvenţă de 3 nucleotide, din totalul de 549 substituţii ale unor nucleotide, aproximativ un sfert (134 nucleotide) reprezintă substituţii cu codoni sinonimi. Acestea sînt adevărate *mutaţii neutre*, care constituie o modificare a informaţiei genetice, dar care nu se reflectă la nivelul catenelor polipeptidice.

Polimorfismul ancestral care afectează macromoleculele de acizi nucleici şi proteine este rezultatul nu al selecţiei naturale, ci al unor procese stochastice, în care hazardul are un rol esenţial. S-a determinat relativ recent că aceste mutaţii neutre care constituie cauza polimorfismelor se produc în mod constant cu o anumită frecvenţă, fără ca ele să determine o capacitate adaptativă superioară a organismelor respective. Cu toate acestea, s-a remarcat că rata apariţiei acestor mutaţii neutre este egală cu rata fixării lor probabilistice în evoluţie. Numai că frecvenţa mutaţiilor neutre într-o populaţie variază nu conform legii Hardy-Weinberg, ci probabilistic.

Se pare că evoluţia nondarviniană are un rol mai important la organismele procariote de tipul bacteriilor şi virusurilor, determinînd existenţa permanentă în cadrul fiecărei specii a unui număr imens de variante genotipice şi fenotipice, aparent inutile, dar care în condiţiile mediului variabil pot avea un rol esenţial în realizarea adaptării lor.

S-ar putea deci conchide că evoluţia darvinistă şi nondarvinistă se completează reciproc, ambele contribuind la explicarea procesului de adaptare a organis-

melor la mediu şi respectiv a modului cum se realizează speciaţia.

GENETICA ŞI EVOLUŢIA OMULUI

Originea şi evoluţia omului constituie una dintre marile probleme la care ştiinţa n-a reuşit încă să dea un răspuns precis şi ferm. Cu toate acestea, mai ales datorită progreselor geneticii, s-au făcut paşi mari înainte în cunoaşterea originii fiinţei umane, a rudelor sale mai mult sau mai puţin apropiate, a mecanismelor care au dus la apariţia sa şi au determinat evoluţia treptată a acestor fiinţe pînă la omul actual.

În prezent este absolut evident că omul, ca şi celelalte specii de plante şi animale, este rezultatul unui lung proces de evoluţie. Această evoluţie care a dus la apariţia omului actual nu s-a desfăşurat în linie dreaptă, ci a însemnat paşi înainte şi înapoi, succese şi eşecuri, linii evolutive ascendente şi altele blocate etc. Încă din miocenul timpuriu, adică acum circa 25—30 milioane de ani, s-a produs o diversificare a unor maimuţe de tip prosimian, din care a rezultat o ramură a hominizilor, din care, printr-un proces continuu de evoluţie, prin schimbări structurale şi funcţionale importante, a rezultat specia umană actuală.

Se pare că una dintre cauzele cele mai importante care au determinat apariţia liniei evolutive a hominizilor a fost răcirea treptată a climatului, care a dus la dispariţia parţială a pădurilor, fapt pentru care animalele respective au trebuit să abandoneze total sau parţial viaţa arboricolă. Ca urmare, selecţia naturală a favorizat mutantele ce erau capabile să fugă repede pe terenuri deschise între un pîlc de arbori şi altul, care erau bipede, fapt care a eliberat mîinile şi a mărit cîmpul vizual al indivizilor respectivi, care aveau

un creier mai dezvoltat şi se puteau orienta în condiţii mai puţin favorabile etc.

Să vedem, în cîteva cuvinte, etapele mai importante care au dus la apariţia speciei umane actuale (*Homo sapiens sapiens*). Cercetările mai noi de genetică umană şi de antropologie par să demonstreze că evoluţia care avea să culmineze cu apariţia omului a început acum circa 25—30 milioane de ani, cînd linia evolutivă umană s-a desprins de linia evolutivă a maimuţelor. Din această linie evolutivă umană s-au constituit în cursul timpului mai multe tendinţe evolutive care au coexistat sute de mii sau milioane de ani, majoritatea dintre ele soldîndu-se cu eşecuri.

Încă acum circa 3 milioane de ani au trăit în Africa un grup de hominide primitive, de talie relativ mică cu o capacitate craniană de circa 800 cm^3. Ulterior, locul hominidelor primitive a fost luat de *Homo erectus*, specie care — aşa cum arată şi numele — era alcătuită din indivizi la care mersul biped devenise preponderent, care avea o capacitate craniană de 900—1 300 cm^3 şi care era alcătuită din populaţii variate răspîndite în toată Lumea Veche.

Acum circa 200 000 de ani s-a conturat o populaţie de hominizi mult mai evoluată şi care, după unii cercetători, a fost denumită *Homo presapiens* şi din care ar descinde direct omul actual.

Un exemplu de eşec al evoluţiei îl constituie omul de *Neanderthal*, care aparţine unei specii foarte înrudite cu omul actual, şi anume *Homo neanderthalensis*. Deşi erau destul de evoluaţi, ştiind să folosească focul, să lucreze lemnul şi osul, posedînd limbaj şi rituri de înmormîntare, oamenii de Neanderthal, care erau răspîndiţi în toată Lumea Veche, au dispărut cu desăvîrşire acum 30—40 000 de ani. Una dintre ipotezele cele mai recente care caută să explice acest fenomen susţine că dispariţia lor totală s-ar datora probabil unor boli ereditare care au schimbat brusc raportul dintre sexe şi au dus la stingerea speciei. Linia evolutivă care a dus la apariţia omului actual a fost continuată de un contemporan al neanderthalienilor, şi anume Omul din Palestina, din care a rezultat acum 30—35 000 de ani *omul fosil*, ce constituie ultima verigă spre omul actual. După unii cercetători, populaţia aceasta ale cărei resturi fosile au fost descoperite în peşterile din Muntele Carmel (Israel) ar fi alcătuită din indivizi extrem de polimorfi, cu caractere intermediare între *H. neanderthalensis* şi *H. sapiens*. Aceasta ar însemna că n-ar fi vorba de specii adevărate, deoarece hibrizii erau interfecunzi.

În ce priveşte mecanismele evoluţiei, mai ales în secolul al XIX-lea, a avut mare circulaţie în biologie concepţia adaptării directe a organismelor la mediu şi a moştenirii caracterelor dobîndite. Genetica modernă a demonstrat că această concepţie este eronată şi că evoluţia reprezintă rezultatul unor schimbări la nivelul materialului genetic, acestea fiind singurele care au importanţă pentru evoluţie. Variabilitatea genotipică în cadrul speciei umane, ca şi a celorlalte specii de plante şi animale, este cauzată de mutaţii ale genelor, de fenomene de recombinare genetică, de izolare genetică a populaţiilor şi de schimburi de gene între populaţii, prin care are loc treptat schimbarea frecvenţei genelor şi implicit a fenotipului. Selecţia naturală a păstrat indivizi ce prezentau adaptări mai evidente şi a eliminat pe cei neadaptaţi, astfel că treptat a apărut omul actual.

Dacă ne referim, de pildă, la inteligenţa omului, este cunoscut faptul că acest caracter este poligenic, adică este determinat de o multitudine de gene plasate pe cromozomi diferiţi. Construirea de unelte şi dezvoltarea mîinii, vînătoarea, limbajul etc. favorizau în mod evident indivizii cu o inteligenţă mai vie, care reuşeau să supravieţuiască. Ca urmare s-a mărit frecvenţa gene-

lor ce condiționează inteligența, capacitatea craniană s-a mărit mereu, astfel că într-o perioadă relativ scurtă, de circa 2—3 milioane de ani, omul a atins (încă acum circa 30 000 de ani) un înalt grad de inteligență care a făcut posibilă dezvoltarea civilizației. Evident că în acest proces munca de creare a uneltelor în special a avut un rol important, în sensul că numai indivizii mai înzestrați intelectual au avut capacitatea de a produce unelte mai perfecționate, de a vîna cu ele animale mai mari și mai puternice, într-un cuvînt de a înfrunta condițiile nefavorabile ale naturii și de a supraviețui. Se poate deci spune că omul a favorizat schimbarea frecvenței genelor ce determină inteligența prin propriile sale creații, produse ale muncii.

În ce privește evoluția omului, s-a constatat că în cei 46 de cromozomi umani se găsește programul prin care ovulul fecundat (care are numai 0,08 mm în diametru) se transformă în timp în om, precum și programul alcătuirii și funcționării organismului omenesc. Genele din cromozomi determină caracteristicile fizice și intelectuale ale omului : faptul că sînt mai înalți sau mai scunzi, cu ochi negri sau albaștri, mai dotați intelectual sau cu posibilități mai reduse, totul este înscris genetic în cromozomi. Evident că educația are un rol important în dezvoltarea capacității intelectuale umane, astfel că posibilitățile înnăscute se pot transforma în realitate.

În prezent s-a reușit să se cunoască în ce constă acest program, cum este el înregistrat în macromoleculele de ADN și chiar modul cum se modifică în timp, adică mecanismele prin care se produce evoluția. Dacă am considera că fiecare pereche de nucleotide din ADN reprezintă o literă a alfabetului vieții, cantitatea de informații existentă în cei 46 de cromozomi din celulele umane echivalează cu 1 000 de cărți a cîte 600 pagini și a cîte 500 cuvinte pe pagină.

Purtăm în noi deci în fiecare celulă o adevărată bibliotecă proprie.

O condiție de bază a existenței omului actual normal este desigur păstrarea nealterată a materialului genetic din cei 46 de cromozomi ai tuturor celulelor somatice. Orice abateri natura le pedepsește grav. Astfel, sînt bine cunoscute astăzi *maladiile cromozomale umane*, prin care apar indivizi anormali, cu cromozomi în plus sau în minus, precum și cu restructurări cromozomale. De regulă, astfel de indivizi prezintă tulburări fizice și psihice grave, rezultate prin modificarea programului genetic caracteristic speciei umane și de obicei nu au descendenți.

În ultimii ani evoluția materialului genetic la primate s-a putut urmări și la nivelul cromozomilor. După cum se știe, specia umană are $2n=46$ cromozomi, în timp ce maimuțele antropoide — ca urangutanul, cimpanzeul și gorila — au toate $2n=48$ cromozomi. Prin compararea cariotipurilor acestor 4 specii s-a putut determina recent, cu precizie, de către 3 cercetători francezi, Catherine Turleau, J. de Grouchy și M. Klein (1972) care sînt restructurările cromozomale intervenite la specia umană : fuziuni între cromozomi cu un singur braț care au dus la reducerea numărului de cromozomi la $2n=46$, inversii pericentrice, translocații etc. Prin folosirea metodelor moderne de bandare a cromozomilor a devenit posibilă identificarea cu precizie a fiecărei regiuni cromozomale, s-a putut reconstitui cariotipul ancestral al strămoșilor noștri (fig. 37).

Deoarece rudele noastre apropiate, maimuțele antropoide : urangutanul, cimpanzeul, gorila și gibonul, au toate cîte 48 de cromozomi, se pare că un moment important în evoluția primatelor care a dus la apariția omului l-a constituit un fenomen de fuzionare a două perechi de cromozomi. S-a trecut astfel de la 48 la 46 de cromozomi.

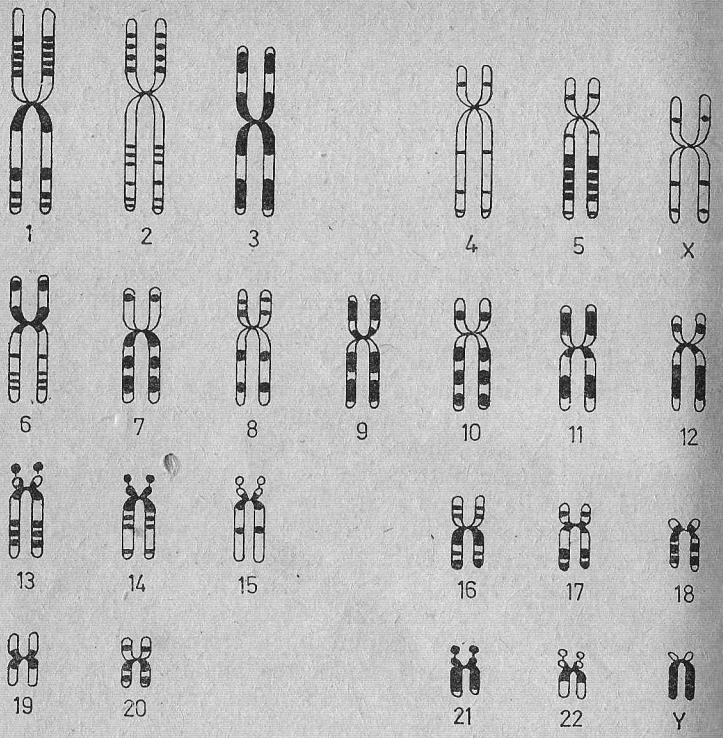

Fig. 37 — Cele 22 perechi de autozomi și o pereche de heterozomi (XY) umani evidențiați prin metode moderne de bandare.

Un cunoscut genetician susținea recent că un astfel de fenomen, odată apărut cu totul întîmplător, s-a putut consolida foarte repede, deoarece prezenta probabil avantaje adaptative. În grupele de indivizi relativ mici care rătăceau în căutarea hranei se realiza o consangvinizare destul de puternică prin împerecheri înrudite de tip frate x soră, mamă x fiu, tată x fiică etc.

Astfel, un individ la care doi cromozomi au fuzionat și care aveau deci $2n=47$, prin încrucișarea cu unul cu $2n=48$, a produs o descendență, din care 50% avea $2n=47$ și 50% avea $2n=48$. După aceea, prin încrucișarea între doi indivizi înrudiți care aveau cîte doi cromozomi fuzionați ($2n=47$), a rezultat o descendență alcătuită astfel, conform legilor mendeliene ale eredității (fig. 38) :

25% indivizi cu $2n=48$;
50% indivizi cu $2n=47$;
25% indivizi cu $2n=46$.

Din această segregare produsă în generația a doua au rezultat și indivizi cu $2n=46$ de tip uman, ceea ce prezenta probabil anumite avantaje selective, comparativ cu ceilalți. Această restructurare cromozomală, alături de altele, s-a putut răspîndi rapid în populațiile umane, care prin evoluție au dat naștere speciei umane actuale.

O concluzie se impune din aceste cercetări, și anume faptul că evenimentele care au determinat apariția omului actual s-au succedat rapid și că în procesul de constituire a programului genetic caracteristic speciei umane, fenomenele de restructurare cromozomală au avut un rol foarte important.

Desigur că omul actual (*Homo sapiens sapiens*) prin originea sa este un animal, care a evoluat însă și a reușit să se desprindă de regnul care i-a dat naștere. Existența unui creier dezvoltat și a unei mari capacități de a învăța constituie una din caracteristicile ființei umane. În timp ce, de pildă, cimpanzeul atinge maturitatea la numai cîțiva ani și trăiește în medie nu mai mult de 20 de ani, omul are o tinerețe mult mai lungă în care el învață mereu. Ca urmare, el acumulează cunoștințele de la generațiile anterioare nu pe cale biologică, ci pe cale socială, nonbiologică, prin în-

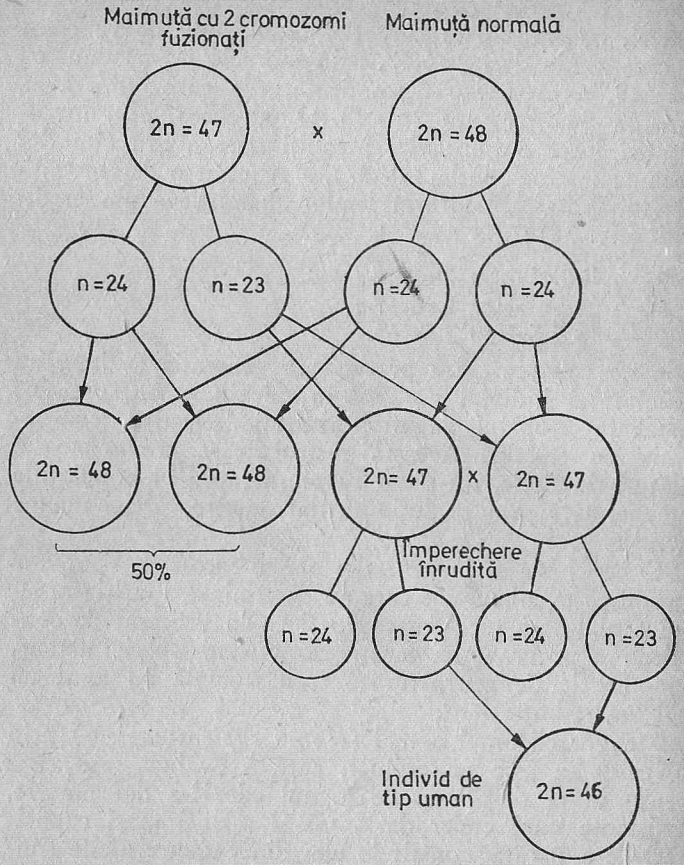

Fig. 38 — Reprezentarea schematică a procesului prin care s-a trecut de la maimuțele cu $2n = 48$ cromozomi la indivizii de tip uman cu $2n = 46$.

termediul limbajului. Iată deci că evoluția biologică în cazul omului este completată de evoluția socială.

În încheiere trebuie subliniat că evoluția este un proces extrem de complex, care s-a realizat pe căi și prin mecanisme extrem de variate, dar în care mutațiile și recombinarea genetică au avut și au un rol primordial. Ele au constituit sursa primară pentru diversificarea vieții pe Pământ, pentru apariția unui număr imens de specii care populează astăzi Terra noastră. Prin mărirea cantității de ADN și prin diversificarea informației genetice, s-au constituit în timp un număr imens de programe genetice ale speciilor actuale. Genetica a adus astfel o contribuție majoră la cunoașterea modului cum a apărut și a evoluat viața pe Pământ.

În sfîrșit, trebuie să arătăm că studiile privind genetica evoluției viețuitoarelor nu au numai importanță teoretică, ci și aplicativă. Astfel, în ultimii ani s-a conturat o ramură nouă a geneticii denumită — *inginerie genetică*, care își propune în esență să realizeze izolarea și sinteza artificială a genelor, manipularea artificială a genelor și cromozomilor, în vederea realizării unor programe genetice artificiale, adică a unor noi forme de viețuitoare cu caractere utile pentru societate. Chiar și în ceea ce privește specia umană, ingineria genetică își propune să realizeze așa-numita *terapie genică* prin care probabil se vor putea corecta defectele unor gene umane, apărute prin mutații defavorabile, fapt care va contribui la eliminarea sau limitarea consecințelor grave provocate de existența celor peste 2 500 maladii ereditare ale omului. Se poate deci conchide că trăim într-o epocă în care omul de știință are posibilități mărite de influențare și de dirijare a evoluției viețuitoarelor, conform cu necesitățile societății umane, și chiar a propriei sale evoluții.

CUPRINS

Ce este viața? 5
Genele și programul genetic al organismelor . . . 8
Etapele apariției vieții pe Pământ 16
Sîntem singuri în univers? 22
Este posibilă sinteza materiei vii? 24
Primele celule procariote și evoluția lor 29
Celula eucariotă, un mare pas înainte în evoluția vieţuitoarelor 32
Originea celulelor eucariote 38
Plante, animale și mai ce? 46
Virusurile și evoluția 52
Genetica populațiilor și evoluția 53
Adaptarea la mediu a vieţuitoarelor 64
Speciația și izolarea genetică 69
Sexele, o mare invenție a naturii 75
Bazele moleculare ale evoluției 83
Duplicația și alungirea genelor; gene hibride . . . 84
Evoluția prin poliploidizare, aneuploidizare și restructurări cromozomale 91
Evoluția nondarvinistă 108
Genetica și evoluția omului 111

Lucrarea prezintă principalele aspecte privind originea și evoluția codului genetic — alfabetul vieții. Condițiile în care s-au format primii acizi nucleici și primele proteine, etapele esențiale de dezvoltare ale primelor forme de viață, geneza speciilor și clasificarea lor în lumina celor mai noi teorii în biologie, ca și perspectivele deschise de cercetările genetice — iată numai cîteva dintre problemele abordate de autor în această carte.

Editura științifică și enciclopedică Lei 2,60